

SW
HW
95.24

ISBN = 919801 H

Energieverbruikseffecten van kasklimaatsetpoints

Effects of greenhouse climate controller
settings on energy consumption

Ir. H.F. de Zwart
Ing. J.P.G. Huijs



imag-dlo



Abstract

De Zwart, H.F. and J.P.G. Huijs. 1995, Effects of greenhouse climate controller settings on energy consumption. IMAG-DLO report 95-24, IMAG-DLO, Wageningen, 61 pp.

The setpoints of greenhouse climate controllers and the application of a thermal screen, CO₂-supply and short time heat storage have a large impact on energy consumption. In this work the effects of air temperature, minimum pipe temperature and humidity setpoints are evaluated for tomato, cucumber and sweet pepper. Moreover the energy saving effects of thermal screens are studied. The energy saving aspects of short term heat storage are investigated in relation to CO₂-supply by exhaust gases of the boiler. The results presented were all computed by a simulation model.

Keywords: Horticulture, energy saving, greenhouse climate control, greenhouse climate simulation

Voorwoord

De moderne kasklimaatregelsystemen bieden de tuinder veel aangrijpingspunten om in kassen de groei van het gewas te beïnvloeden teneinde een groot volume aan kwalitatief goede produkten voort te brengen. De gewasontwikkeling wordt hierbij vooral gestuurd met behulp van de dag- en nachttemperatuur. Vergroting van het produktievolume wordt bereikt door CO₂-dosering en een hoge produktkwaliteit wordt, onder andere, gerealiseerd door de toepassing van een vocht-regeling en de minimumbuis temperatuur.

De conditionering van het kasklimaat kost echter veel energie. Het is daarom belangrijk dat een bewuste afweging kan worden gemaakt tussen de energie-input die gerelateerd is aan de realisering van een bepaald kasklimaat en het effect op de produktie dat hiervan verwacht wordt.

Vooralsnog kan het effect van het kasklimaat op de gewasgroei niet betrouwbaar worden gekwantificeerd, maar berust de inschatting van dit effect voor een groot deel op de 'groene vingers' van tuinders.

Met een recent door IMAG-DLO ontwikkeld kasklimaatmodel kan echter wel het energiegebruik worden bepaald dat hoort bij een bepaald ingesteld kasklimaat. Met dit model kan de energiebesparing die mag worden verwacht van lagere kaslucht- en minimumbuis temperaturen en een hogere luchtvochtigheid goed worden berekend. Ook kan met dit model het energieverbruiks-effect van een energiescherm en een warmte-opslagtank worden bepaald.

In dit rapport zijn deze effecten voor de drie belangrijkste groentegewassen in de Nederlandse glastuinbouw geanalyseerd. De resultaten daarvan zijn in dit rapport in grafieken en tabellen weergegeven. Daarnaast zijn er nog een groot aantal berekeningen gemaakt waarvan de resultaten op diskette zijn vastgelegd. Deze bij het rapport behorende diskette bevat tevens een programma dat de opgeslagen informatie toegankelijk maakt. De onderzoeksresultaten kunnen daardoor door elke tuinder direkt worden benut bij het nemen van beslissingen.

Dit rapport en het onderzoek en de ontwikkeling van het computerprogramma is ondersteund met gelden uit de heffing op de aardgasprijs in het kader van de Meerjarenaafpraak-Energie voor de glastuinbouw en de programmafinanciering van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.

Wageningen, 6 november 1995

Ir. A.A. Jongebreur
directeur

Inhoud

Samenvatting	6
1 Inleiding	8
2 Literatuuroverzicht	10
3 Methode en uitgangspunten	12
3.1 Het IMAG-DLO simulatiemodel -KASPRO-	12
3.2 Kasconfiguratie	12
3.2.1 Kasconstructie	13
3.2.2 Bedrijfsuitrusting	13
3.2.3 Kasklimaatregeling	14
3.3 Gebruikte weergegevens	14
4 Resultaten	18
4.1 Inleiding	18
4.2 Gasverbruikseffecten bij tomaten	18
4.2.1 Standaardbedrijfssituatie	18
4.2.2 Gasverbruik bij gewijzigde setpointinstellingen	19
4.2.2.1 Verandering van de stooktemperatuur	19
4.2.2.2 Toepassen van minimumbuis	20
4.2.2.3 Effect van verandering van de vochtgrens	21
4.2.2.4 Effect van een energiescherm	22
4.2.2.5 Gasverbruik bij CO ₂ -dosering en warmte-opslag	23
4.2.3 Conclusies voor de tomatenteelt	24
4.3 Gasverbruikseffecten bij komkommers	25
4.3.1 Standaardbedrijfssituatie	25
4.3.2 Gasverbruik bij gewijzigde setpointinstellingen	27
4.3.2.1 Verandering van de stooktemperatuur	27
4.3.2.2 Toepassing van minimumbuis	27
4.3.2.3 Verandering van de vochtgrens	28
4.3.2.4 Verandering van schermtype	29
4.3.2.5 CO ₂ -dosering en warmte-opslag	30
4.3.3 Conclusies voor de komkommerteelt	32
4.4 Gasverbruikseffecten bij paprika	33
4.4.1 Standaardbedrijfssituatie	33
4.4.2 Gasverbruik bij gewijzigde setpointinstellingen	34
4.4.2.1 Verandering van de stooktemperatuur	34
4.4.2.2 Toepassing van minimumbuis	35
4.4.2.3 Verandering van de vochtgrens	35
4.4.2.4 Effect energiescherm	36
4.4.2.5 CO ₂ -dosering en warmte-opslag	37
4.4.3 Conclusies voor de paprikateelt	39
4.5 Samenvatting energieverbruikseffecten	39
5 Het programma setpoint	42
5.1 Inleiding	42

5.2 De werking van het programma SETPOINT	42
5.3 Rekenalgoritmen	44
5.3.1 Warmte-opslag en CO ₂ -dosering	44
5.3.1.1 Berekening van het warmte-aanbod	44
5.3.1.2 Berekening van het warmte-overschot	45
5.3.1.3 Berekening van de bufferwerking	45
5.3.1.4 Berekening van het effect van afluchten	47
5.3.2 Gewasgroei-effecten	47
5.3.3 Teelteffect	48
6 Conclusies en aanbevelingen	49
Summary	51
Literatuur	53
Bijlage: KASPRO in vergelijking met metingen	54

Samenvatting

In het recente verleden zijn een aantal rapporten en vakblad-publicaties verschenen waarin de energieverbruikseffecten van de instelling van kasklimaatsetpoints en bedrijfsuitrusting werden beschreven. Hierin werd ingegaan op de effecten van stooktemperatuur, minimumbuis-temperatuur, scherm-gebruik, CO₂-dosering en warmte-opslag. Uit de literatuur spreekt een tendens om gebruik te maken van modellen omdat er aan praktijkonderzoek problemen kleven ten aanzien van representativiteit en reproduceerbaarheid. Daarom zijn ook de resultaten die in dit rapport worden gepresenteerd middels modelberekeningen verkregen.

In de literatuur worden vooral de jaarrond-effecten getoond. Met name voor de gasverbruikseffecten van setpoint-instellingen is informatie over het jaarrond-effect veelal te weinig gedetailleerd, omdat tuinders hun setpoints regelmatig wijzigen. Daarom zijn in dit rapport de energieverbruikseffecten op maand-basis weergegeven.

Om de effecten van veranderingen in kasklimaatsetpoints en bedrijfsuitrusting aan te kunnen geven moet een uitgangssituatie worden gedefinieerd. Daartoe is het simulatiemodel geconfigureerd naar een moderne Venlo-kas met een kasklimaatcomputer met de gebruikelijke instellingen. Het buitenklimaat waaraan de gesimuleerde kas bloot staat is beschreven door het SEL-jaar, dat geldt als een gemiddeld nederlands jaar. In het rapport wordt een vergelijking gepresenteerd van het SEL-jaar met het weer van de afgelopen vijf jaren.

Het simulatiemodel is gebruikt om voor de drie belangrijkste Nederlandse glasgroentegewassen (tomaat, komkommer en paprika) de energieverbruikseffecten van stooktemperatuur, minimumbuis-temperatuur, vochtgrens, schermgebruik en CO₂-dosering en warmte-opslag te analyseren. Daartoe is eerst voor elk van de gewassen een uitgangssituatie gedefinieerd. De effecten zijn telkens één voor één bestudeerd. De resultaten zijn in grafieken op maand- en jaarbasis gepresenteerd en in tabellen samengevat.

De absolute energieverbruikseffecten van de bestudeerde opties variëren van $-8,6 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (besparing door een energiescherm bij tomaten) tot $+15,4 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (CO₂-dosering ongeacht de warmtevraag door de verbranding van 100 m³ aardgas per hectare per uur op een bedrijf zonder warmtebuffer). Van alle bestudeerde invloedsfactoren voor elk van de drie teelten is het energieverbruikseffect van CO₂-dosering het grootst, tenzij een warmtebuffer wordt toegepast. Wanneer een buffer wordt gebruikt is het energieverbruikseffect van een hoge minimumbuis-temperatuur het grootst.

Veranderingen in de stooktemperatuur geven een energieverbruikseffect te zien van ongeveer 10% per °C. Verhoging van de vochtgrens van 80% RV naar 90% RV levert een energiebesparing van rond de 6%, terwijl een verlaging van de vochtgrens naar 70% RV op een meer-gebruik van rond de 9% uitkomt.

Het gebruik van een beweegbaar energiescherm levert in de tomaten-teelt een besparing van 16% procent ten opzichte van de uitgangssituatie. In de paprika-teelt is het energieverbruikseffect van het energiescherm 11%. Voor de komkommerteelt, waar in de uitgangssituatie de eerste maand van de teelt een vast scherm wordt gebruikt, leidt de vervanging van het vaste scherm door een beweegbaar scherm dat de hele koude periode van het jaar kan worden gebruikt tot een besparing van 7%.

Een warmtebuffer van 50 m³ha⁻¹ levert een energiebesparing van ongeveer 6 m³m⁻²jaar⁻¹ ten opzichte van een situatie zonder buffer, wanneer de CO₂-dosering meer dan 60 m³ha⁻¹uur⁻¹ bedraagt. Een tank van 100 m³ha⁻¹ levert een besparing van ongeveer 8 m³m⁻²jaar⁻¹.

Om ook vanuit andere dan de in dit rapport gehanteerde uitgangssituaties de energiever-

bruikseffecten van kasklimaat-setpoints en bedrijfsuitrusting te kunnen bestuderen is in het kader van dit onderzoek een nieuw computerprogramma ontwikkeld. Dit programma stelt de gebruiker in staat om interactief gasverbruikseffecten te bestuderen vanuit een willekeurige uitgangssituatie. De te veranderen variabelen betreffen ook hier de stook-temperatuur, de minimumbuistemperatuur, de vochtgrens, het schermgebruik, bufferafmeting en CO₂-dosering. De werking van het programma en de daarin toegepaste berekeningen worden in dit rapport kort uiteengezet.

Het programma en de daarbij behorende gebruikershandleiding moet worden beschouwd als een onderdeel van dit rapport. Het programma is opgeslagen op een diskette.

1 Inleiding

In de verwarmde glastuinbouw vormt energie één van de input-factoren waarmee de tuinder zijn productie realiseert. De hoeveelheid energie die verbruikt wordt hangt samen met het kasklimaat dat de tuinder wil realiseren. Dit gewenste kasklimaat wordt zo goed mogelijk in stand gehouden door de kasklimaatregelaar, die daartoe een aantal kasklimaatsetpoints gebruikt. Kasklimaatsetpoints hebben dus een relatie tot het energieverbruik en bij de instelling van de setpoints moet een afweging gemaakt worden tussen de energiekosten die aan het realiseren van het kasklimaat verbonden zijn en de opbrengsten die daar naar verwachting uit voort vloeien.

Een betrouwbare beschrijving van het effect van het kasklimaat op gewasgroei ligt nog een eind in de toekomst, hoewel er met betrekking tot de groei van tomaten belangrijke wetenschappelijke vorderingen worden gemaakt (de Koning, 1994; Heuvelink 1995). Alleen de relatie tussen CO₂-dosering en gewasgroei is vrij goed gekwantificeerd (Nederhoff, 1994). De inschatting van de effecten van temperatuur- en vochtregimes berust vooralsnog voor een groot deel op 'groene vingers gevoel'.

De kosten die voortvloeien uit het energieverbruik ten behoeve van het realiseren van een bepaald kasklimaat kunnen echter wel met vrij grote zekerheid bepaald worden met behulp van kasklimaat simulatiemodellen (Houter, 1992; de Zwart, 1996). In dit rapport zullen deze energieverbruikseffecten van veranderingen in kasklimaatsetpoints worden gepresenteerd. In het recente verleden zijn in een groot aantal vakblad-publicaties en artikelen relaties tussen de instelling van de kasklimaatsetpoints en energieverbruik gekwantificeerd (Breuer, 1987; Vermeulen, 1992; Rijdsijk, 1993). In hoofdstuk 2 wordt een globaal overzicht gegeven van literatuur die op dit gebied is verschenen. Veelal hebben deze relaties betrekking op jaarlijkse situaties. Echter, het zal duidelijk zijn dat de effecten van setpoint-wijzigingen op het energieverbruik van seizoen tot seizoen verschillen. Zo zal het verhogen van het kasluchttemperatuur setpoint in de zomer een veel kleiner effect hebben dan in de winter. In dit rapport worden energieverbruikseffecten daarom naar maand uitgesplitst.

Een probleem dat zich in praktijkonderzoek vaak voordoet, is dat de te onderzoeken energieverbruikseffecten niet geïsoleerd kunnen worden van allerlei andere effecten. Het toeschrijven van waargenomen verschillen in energieverbruik aan één of een klein aantal invloedsfactoren, terwijl er altijd nog tal van andere invloedsfactoren zijn (teeltwijze, lokaal klimaat), geeft daardoor niet een zuiver beeld van de bestudeerde invloedsfactor(en). Daarom is in dit onderzoek gekozen voor een modelmatige benadering. Hiervoor is het IMAG-DLO kasklimaat simulatieprogramma KASPRO gebruikt. Dit simulatiemodel is uitgebreid getest door vergelijking van modelresultaten met metingen. In hoofdstuk 3 wordt het simulatiemodel in grote lijnen beschreven. In de bijlage worden ter illustratie een aantal van deze vergelijkingen van modelresultaten met metingen getoond.

Een model is weliswaar een benadering, maar bij de bestudering van verschillen werken de benaderingsfouten op dezelfde wijze in op alle berekeningen, zodat fouten in verschillen berekeningen beperkt blijven.

Modelsimulaties vereisen altijd een groot aantal uitgangspunten. Daarom worden in hoofdstuk 3 de uitgangspunten voor de modelberekeningen die in dit onderzoek zijn uitgevoerd gedetailleerd vastgelegd. Dit betreft uitgangspunten ten aanzien van de kasconstructie, de vaste instellingen van de klimaatregelaar en het gebruikte weer-bestand.

In hoofdstuk 4 wordt vervolgens ingegaan op energieverbruikseffecten van een aantal setpointinstellingen (temperatuur, vocht en minimumbuis), verschillen in schermgebruik en de toepassing van CO₂-dosering en warmte-opslag. De effecten worden bestudeerd voor de drie grootste groente-gewassen in de nederlandse glastuinbouw (tomaat, paprika en komkommer).

Om een goede aansluiting met de praktijk te realiseren is hiertoe voor elk van de drie gewassen een zorgvuldig gekozen uitgangssituatie met betrekking tot het teeltregime opgesteld. Ten behoeve van de analyse van gasverbruikseffecten wordt hierop telkens één invloedsfactor gewijzigd.

Echter, bij de bestudering van de onderzoeks-resultaten zal blijken dat het moeilijk blijft de resultaten toe te passen op individuele bedrijven. Dit ondanks de 42 simulaties die voor de gepresenteerde effecten zijn gemaakt. Daarom zijn behalve de getoonde situaties nog 171 andere situaties gesimuleerd. De resultaten hiervan zijn echter niet op papier gezet maar zijn op de bijgevoegde diskette ondergebracht. Tevens staat op de diskette een programma dat deze resultaten kan presenteren. Wat echter belangrijker is, is dat dit programma verschillende situaties met elkaar kan combineren en tussen verschillende situaties kan interpoleren. Hierdoor kunnen energieverbruikseffecten worden bestudeerd vanuit een willekeurige uitgangssituatie. De berekeningen die het programma hiertoe uitvoert worden uiteengezet in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 worden een aantal conclusies getrokken naar aanleiding van het onderzoek en worden enkele aanbevelingen gedaan.

2 Literatuuroverzicht

Vanaf ongeveer 1960 heeft in de Nederlandse glastuinbouw een geleidelijke overgang plaatsgevonden van onverwarme kassen naar kassen die zijn uitgerust met een uitgebreid verwarmingssysteem. In 1991 was het gemiddeld aardgasverbruik in de groente-sector ongeveer 41 m^3 per m^2 kas per jaar, in de snijbloemen-sector ruim $42 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ en in de potplanten bijna $50 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (Van der Velden en van der Sluis, 1993). De laatste jaren is door intensivering van de CO_2 -gift, vooral in de groenteteelt het gemiddeld verbruik nog verder toegenomen. Momenteel wordt deze hoge energie-input als een maatschappelijk probleem gezien. In de Meerjarenafpraak-Energie, die door de overheid en de glastuinbouw is opgesteld wordt daarom gestreefd naar een verlaging van het energieverbruik per eenheid produkt. Een belangrijk instrument daarbij is de (nadere) ontwikkeling van energiebesparingstechnieken, maar vooral de verbetering van de penetratiegraad van reeds bestaande technieken (Meerjarenafpraak, 1993).

Al in 1987 werd een op modelonderzoek gebaseerd rapport gepubliceerd waarin het gasverbruikseffect van een aantal klimaat-regelaar instellingen en het energie-scherm gebruik werden aangegeven (Breuer, 1987). Hierin werden de effecten op jaar-basis van stook-temperatuur, minimumbuis, droogstoken en het energiescherm voor tomaat/komkommer, roos en anjer (1^e jaar) berekend.

De berekeningen gaven aan dat voor alle gewassen de verandering van de stooktemperatuur tot gasverbruiksverschillen leidde van ongeveer 9% per graad verschil. Het weglaten van een minimumbuis temperatuur verminderde de gasconsumptie bij de teelt van groente-gewassen met 6%, bij de rozen met slechts 1% en bij de anjers met maar liefst 14%. Het gasverbruik in verband met droogstoken en de lichtafhankelijke setpointverhoging was bij rozen 3% voor elk effect. Bij de andere gewassen bepaalde de lichtafhankelijke setpointverhoging rond de 2% en het droogstoken 6% van het gasverbruik. Schermen leverde een energiebesparing op tussen de 10 en 20%.

De afgelopen jaren gaat de aandacht in vakblad-artikelen niet zozeer naar stook-temperatuur en schermen, twee zaken die in het rapport van Breuer in het middelpunt van de belangstelling stonden, maar naar minimumbuis, warmte-opslag en CO_2 -dosering (Bakker, 1994; Rijdsdijk, 1993; Vermeulen 1995; Nederhoff, 1990). Bakker (1994) rapporteerde dat uit praktijk-proeven die werden uitgevoerd in februari tot en met april 1993 minimum-buis instellingen van 50°C en 70°C in die maanden in respectievelijk 12% en 68% extra gas verbruik resulteerden ten opzichte van de Ausgangssituatie. De minimumbuis temperatuur werd het hele etmaal aangehouden, maar werd overdag wel op lichtniveau afgebouwd.

Met betrekking tot CO_2 -dosering en warmte-opslag is een rapport verschenen waarin extra gasverbruik en extra produktie als functie van het volume van de warmte-opslag tank en de gewenste CO_2 -concentratie worden gepresenteerd (Vermeulen en van de Beek, 1992). De tabellen in deze publikatie zijn berekend door middel van een simulatiemodel. Uit de tabellen kan bijvoorbeeld worden opgemaakt, dat bij het realiseren van een CO_2 -concentratie van 600 ppm met ketelrookgasen zonder warmte-opslagtank bij komkommer een extra gasverbruik van $12 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ en bij tomaat een extra verbruik van $19 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ optreedt. Een tank van $100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ vermindert deze extra verbruiken naar respectievelijk 5 en $11 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$.

De instelling van kasluchttemperatuur-nivo's komt alleen aan de orde in artikelen over het regelen op etmaal-temperatuur in plaats van het volgen van een vast traject (de Koning, 1994).

Blijkbaar beschouwt de tuinbouwpraktijk de kasluchttemperatuur als een vereiste, en niet zozeer als een variabele.

Behalve het eerder genoemde werk van Breuer werd er geen literatuur aangetroffen met betrekking tot het gasverbruiks-effect van vochtregeling, hoewel wel algemeen bekend is dat met het luchten op vocht nogal wat energie gemoeid is.

In de literatuur is een duidelijke ontwikkeling waar te nemen van publikaties die zijn geschreven op grond van metingen op (semi-)praktijkschaal naar een meer modelmatige benadering van energieverbruikseffecten. De in dit werk gehanteerde aanpak sluit dan ook goed bij deze ontwikkeling aan.

3 Methode en uitgangspunten

Alle energieverbruikseffecten die in dit rapport gepresenteerd worden zijn berekend met het kasklimaatmodel KASPRO. Energieverbruikseffecten zijn gekwantificeerd door het model toe te passen op een groot aantal combinaties van kasklimaatinstellingen en bedrijfsuitrustingen en vervolgens de resultaten die het model ten aanzien van energieverbruik daarvoor berekende met elkaar te vergelijken.

In dit hoofdstuk wordt eerst het simulatiemodel in grote lijnen gepresenteerd. Vervolgens worden de aannames die voor de berekeningen zijn gedaan vastgelegd. Tenslotte wordt het gebruikte bestand met weergegevens toegelicht en geplaatst tegen de achtergrond van de weergegevens van een aantal jaren (1990 t/m 1994).

3.1 Het IMAG-DLO simulatiemodel -KASPRO-

Een simulatiemodel is een vereenvoudigde representatie van een deel van de werkelijkheid. De basis van zo'n simulatiemodel is een aantal gekwantificeerde relaties tussen grootheden.

De belangrijkste grootheden die in het simulatiemodel KASPRO (een acroniem voor KAS PROCESSen) een rol spelen zijn de kasluchttemperatuur, CO₂-concentratie en relatieve vochtigheid. De klimaatregelaar die aan het model gekoppeld is probeert deze grootheden zo goed mogelijk in overeenstemming te houden met de setpoints die ervoor gesteld zijn. De tussenvoeging 'zo goed mogelijk' is geplaatst omdat, evenals in een echte kas, de kasluchtcondities vaak aanzienlijk kunnen afwijken van de gewenste waarden (bijvoorbeeld in de zomer, wanneer het meestal veel warmer is dan het kasluchttemperatuur-setpoint).

Naast de beschrijving van temperatuur, vochtigheid en CO₂-concentratie bevat het model nog een groot aantal andere grootheden en relaties. Hierbij moet worden gedacht aan pijptemperaturen, de temperatuur van de bodem en het kasdek, de schermtemperatuur en de planttemperatuur.

Het buitenklimaat is natuurlijk een van de meest prominente invloedsfactoren. Daarom gebruikt het simulatiemodel uurlijkse weer-gegevens van de luchttemperatuur, de luchtvochtigheid, diffuse en directe straling, de windsnelheid en de hemeltemperatuur. De hemeltemperatuur is een fictieve temperatuur, die een maat geeft voor het stralingsverlies naar de atmosfeer. In de meeste weer-bestanden komt deze grootheid niet voor, maar er zijn een aantal methoden om de hemeltemperatuur met een redelijke nauwkeurigheid te schatten aan de hand van het verloop van andere meteogegevens (bewolgingsgraad, luchttemperatuursveranderingen in de nacht en stralingsintensiteiten overdag).

Het simulatiemodel is een dynamisch model, wat wil zeggen dat de waarde van grootheden op een tijdstip worden bepaald door de veranderingen van die grootheden ten opzichte van een vorig tijdstip te berekenen. Nadere details van het model zijn uitgebreid beschreven (de Zwart, 1996) en worden in dit kader niet verder uiteengezet.

Om aan te geven dat de modelberekeningen een hoge realiteitswaarde hebben zijn in bijlage I vergelijking van model-resultaten met metingen gepresenteerd.

3.2 Kasconfiguratie

Om berekeningen te kunnen maken met het simulatiemodel moet een kas als uitgangssituatie worden genomen. De beschrijving van de uitgangssituatie betreft de kasconstructie (afmetingen, soort bedekking, gewas), de bedrijfsuitrusting (condensor, warmtebuffer, CO₂-doseersys-

teem) en de werking van de kasklimaatregelaar. Deze punten worden in afzonderlijke paragrafen behandeld.

3.2.1 Kasconstructie

In de simulaties is uitgegaan van een Venlo-warenhuis met aan elke zijde van het dek op iedere acht ruiten een half tweeruits luchtraam in de nok. Hierdoor heeft de kas $0,0625 \text{ m}^2$ raamoppervlak per m^2 kas aan de lijzijde en een even groot deel aan de loefzijde van de kas. De dakhelling bedraagt 25° , de ruitbreedte is op 1 meter en de goothoogte op 3,5 meter gesteld. De gootrichting is noord-zuid.

De modelkas is uitgerust met een enkelglas dek. Het lichtverlies door reflecties op het glas en lichtonderschepping door goten en roeden is met een geavanceerd model berekend als functie van zonshoogte en azimuth (de hoek tussen de zon en de noord-zuid as). Dit model berekent de diffuse doorlatendheid van het kasdek op 79%. Van het licht dat door het kasdek binnenkomt wordt verondersteld dat nog eens 10% wordt onderschept door constructiedelen (pijpen, tralies, poten enz.). De totale diffuse doorlating komt daarmee op 71%.

De kas bestaat uit 37 kappen en beslaat met een gootlengte van 84,5 m en een kapbreedte van 3,20 m een oppervlak van 1 ha. De verhouding geveloppervlak staat tot kasoppervlak is hiermee 0,142. Het middenpad beslaat 4 procent van het kasoppervlak.

Bij gesloten ramen treedt lekverlies op. Het ventilatievoud dat daarbij optreedt is lineair afhankelijk gesteld van de windsnelheid en bedraagt 0,19 per m/s.

De kas is uitgerust met twee verwarmingsnetten, te weten een buisrailnet, bestaande uit vier 51-ers per kap en een bovennet van twee 28 mm pijpen per kap. Het bovennet fungeert als secundair net.

Als er in de kas een energiescherm wordt aangebracht dan hangt dit direkt onder de goot. Voor een beweegbaar scherm is het schermdoek vocht-doorlatend verondersteld. Dit betekent dat vocht dat aan de onderzijde van het scherm condenseert aan de bovenzijde weer kan verdampen. Een vast scherm is niet vocht-doorlatend.

3.2.2 Bedrijfsuitrusting

In de warmtevraag van de kas wordt voorzien door een ketel zonder condensor. Hierdoor heeft het verwarmingssysteem een rendement van 0,85 op bovenwaarde. Indien de belangstelling uitgaat naar het gasverbruik van bedrijven mét een condensor dan kunnen de absolute gasverbruiken die in het rapport worden genoemd worden gedeeld door 0,85 en vermenigvuldigd met een hoger rendement. Dit hogere rendement zal ergens tussen de 0,90 en 0,93 liggen, afhankelijk van de configuratie waarin de condensor is aangesloten op het verwarmingssysteem.

In de uitgangssituatie vindt de CO_2 -dosering plaats op basis van warmtebehoefte met rookgasen van de ketel. Een warmte-opslagtank (buffer) is in dat geval niet nodig. In hoofdstuk 4 worden echter een aantal situaties met CO_2 -dosering ongeacht de warmtevraag doorgerekend. Daarbij worden buffers toegepast van 50 en $100 \text{ m}^3/\text{ha}$. Behalve de bufferafmeting wordt in de betreffende simulaties ook de CO_2 -doseersnelheid gevarieerd. Er wordt daarbij uitgegaan van voldoende capaciteit van het verdeelsysteem.

3.2.3 Kasklimaatregeling

De klimaatregelaar regelt temperatuur, vocht en CO₂-gehalte van de kaslucht. De temperatuurregeling vindt plaats middels twee verwarmingsnetten. Het buisrailnet wordt als primaire net gebruikt. Op momenten dat de temperatuur in het ondernet oploopt boven 65 °C wordt het bovennet bijgeschakeld, waardoor het als secundair net gaat functioneren.

De door de temperatuurregelaar bepaalde gewenste buistemperaturen worden door een mengklep (zo goed mogelijk) gerealiseerd, waarbij de klep geregeld wordt op de watertemperatuur direct achter het mengpunt. Indien een minimumbuistemperatuur wordt gehanteerd geldt deze dus aan de aanvoerkant van het verwarmingscircuit.

De stooklijn wordt bepaald uit het dag- en nachtsetpoint, waarbij de helling bij de overgangen tussen deze setpoints op 1 °C/uur gesteld is. De stijging naar het dagsetpoint wordt op een zodanig moment ingezet dat de dagwaarde bij zonsopkomst bereikt is. De verlaging wordt ingezet op zonsondergang. Een lichtafhankelijke setpointverhoging wordt gehanteerd door het kasluchttemperatuur-setpoint met 2 °C te verhogen over het zonstralingstraject van 100 tot 300 W/m² (buiten de kas gemeten). Over ditzelfde stralingstraject wordt de minimumbuistemperatuur van de ingestelde waarde afgebouwd naar het actuele kasluchttemperatuur-setpoint.

De ventilatielijn staat één graad boven de stooklijn. Bij het afbouwen van de stooklijn bij het invallen van de avond loopt de ventilatielijn daarbij ook nog een half uur achter op de stooklijn. De ramen worden voor iedere graad overschrijding van de ventilatielijn 10% geopend. Indien de lijzijdige luchting meer dan 60% geopend is (dus bij een kasluchttemperatuur van 6 °C boven de ventilatielijn), gaan de loefzijdige ramen meelopen. In feite staat de ventilatielijn voor de loefzijdige ramen 6 °C boven de ventilatielijn van de lijzijdige ramen. De proportionaliteitsfactor van de loefzijdige ramen is echter twee keer zo groot als die van de lijzijdige ramen (20% per °C).

Behalve op temperatuur worden de ramen ook nog geregeld op vocht. Bij overschrijding van de ingestelde RV worden de lijzijdige ramen 2% per procent overschrijding geopend.

Indien een beweegbaar energiescherm wordt toegepast, dan wordt dit gesloten indien de buitentemperatuur in de nacht beneden de 5 °C zakt. Eenmaal gesloten, dan gaat het scherm, wanneer het in de komkommer- of paprikateelt wordt toegepast, pas weer open als er buiten meer dan 30 W/m² globale straling wordt gemeten. In de tomatenteelt wordt het scherm bij zonsopkomst geopend. Als de RV in de kas boven de ingestelde waarde komt wordt er een vochtkier getrokken. De vochtkier bedraagt 12 cm.

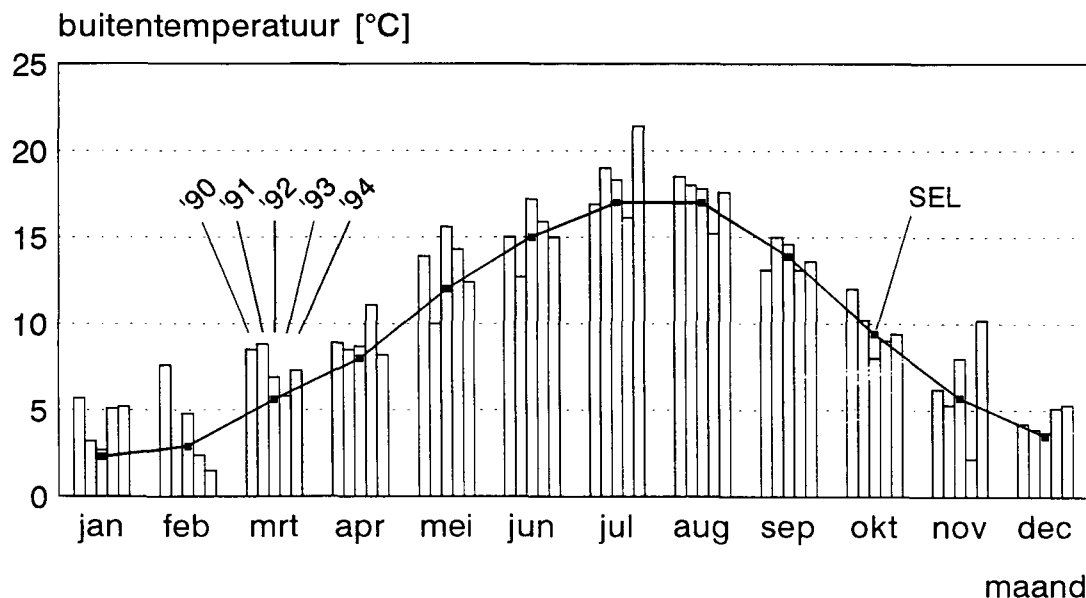
3.3 Gebruikte weergegevens

De energieverbruiken zijn berekend aan de hand van klimaatgegevens uit het SEL-jaar, een acroniem voor een set van geSElecteerde weergegevens.

Het SEL-jaar is een bestand met meetgegevens dat een gemiddeld Nederlands jaar weergeeft. Het is opgebouwd uit twaalf maand-bestanden met gemiddelde uurwaarden voor de belangrijkste weergegevens. De maandbestanden zijn geselecteerd uit weergegevens van het KNMI voor De Bilt over de periode 1971 t/m 1980. Zo is de januari-maand van 1971 in het SEL-bestand opgenomen als typisch Nederlands weer in de maand januari. De maand februari in het SEL-jaar is afkomstig uit de meteogegevens van februari 1973. De keus om een bestand met weergegevens samen te stellen uit maand-gegevens is gemaakt om de dynamiek in het dagelijkse weer te behouden. Dit in tegenstelling tot rekenkundige gemiddelden over meerdere jaren, waar de dagelijkse variatie door de middelingen sterk verminderd wordt. Vooral de klimaatfactoren buitentemperatuur en globale straling hebben een grote invloed op het energieverbruik. Om een beeld te kunnen vormen van het weer zoals dat in het SEL-jaar is

vastgelegd, wordt in de figuren 3.1 t/m 3.3 en tabel 3.1 de vergelijking gepresenteerd van deze belangrijkste weergegevens in het SEL-jaar ten opzichte van de jaren '90 t/m '94.

Figuur 3.1 toont de gemiddelde buitentemperatuur per maand voor het SEL-jaar en de jaren '90 t/m '94.

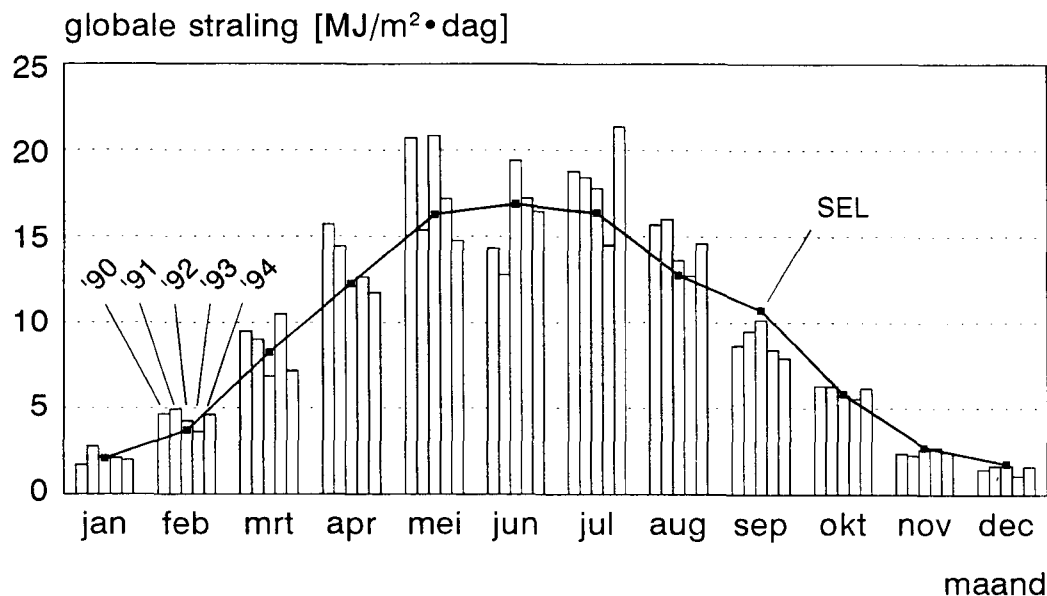


Figuur 3.1 Gemiddelde buitentemperaturen per maand in het SEL-jaar en de jaren '90 t/m '94.

Figure 3.1 Average monthly outside temperature in the SEL-year and the years '90 up to '94.

In figuur 3.1 komt tot uiting dat gemiddelde temperatuur per maand van jaar tot jaar sterk kan verschillen. Voor de meeste maanden liggen de waarden van het SEL-jaar tussen de uitersten die de afgelopen vijf jaar voor deze maanden gemeten zijn. Gemiddeld genomen waren de laatste jaren echter warmer dan het SEL-jaar.

De vergelijking van de hoeveelheid zonlicht in het SEL-jaar met de hoeveelheid zonlicht in de afgelopen 5 jaar wordt getoond in figuur 3.2.

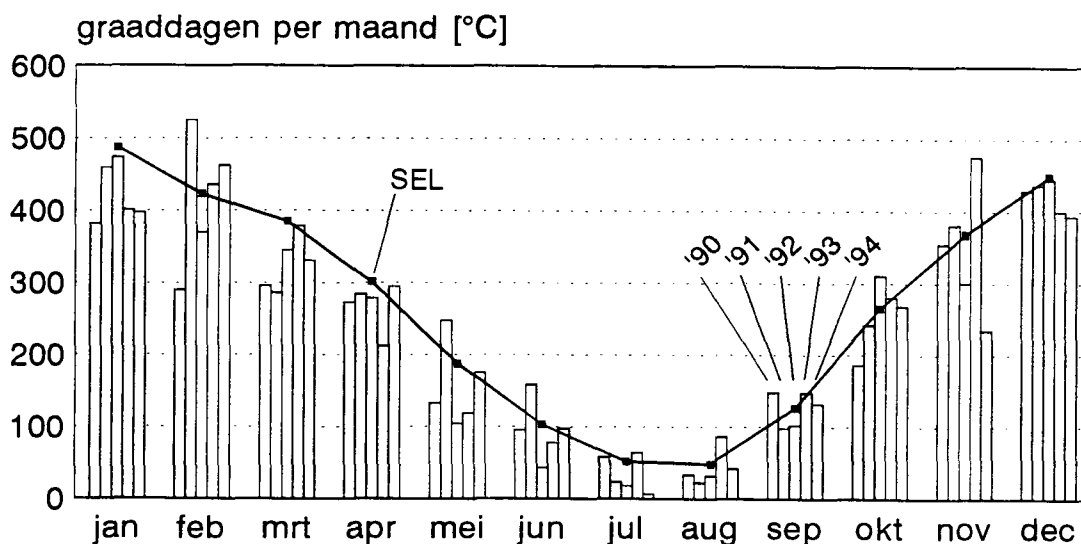


Figuur 3.2 Gemiddelde dagelijkse lichtsom per maand in het SEL-jaar en de jaren '90 t/m '94.

Figure 3.2 Daily mean solar radiation totals per month in the SEL-year and the years '90 up to '94.

De gemiddelde dagelijkse hoeveelheid zonstraling per dag geeft gedurende het jaar grote verschillen te zien en is in de zomermaanden ongeveer 10 keer zo groot als in de winter (mei t/m juli circa $17 \text{ MJm}^{-2}\text{dag}^{-1}$ en december circa $1,7 \text{ MJm}^{-2}\text{dag}^{-1}$). De variatie per maand in de diverse jaren is zeer groot en bedraagt soms meer dan 30% (juli 1993 $14 \text{ MJm}^{-2}\text{dag}^{-1}$ en juli 1994 $22 \text{ MJm}^{-2}\text{dag}^{-1}$). De laatste jaren waren gemiddeld lichter dan het SEL-jaar.

Een andere maat, die meer nog dan de gemiddelde temperatuur een indicatie geeft van de stook-behoefte is het aantal graaddagen (Van der Velden en van de Sluis, 1993). Het aantal graaddagen per jaar is een cumulatie van het aantal graden dat de gemiddelde etmaaltemperatuur onder de 18°C ligt. Zo draagt een dag met een gemiddelde etmaaltemperatuur van 12°C 6 graaddagen bij aan het jaar-totaal. In figuur 3.3 zijn het aantal graaddagen per maand volgens het SEL-jaar en het aantal graaddagen voor deze maanden in de jaren '90 t/m '94 weergegeven.



Figuur 3.3 Aantal graaddagen per maand in het SEL-jaar en de jaren '90 t/m '94.

Figure 3.3 Monthly cumulation of the daily mean temperature beneath 18°C in the SEL-year and the years '90 up to '94.

Uit de figuur blijkt dat er soms zeer grote verschillen optreden in dezelfde maand van verschillende jaren (februari 1990 had 295 graaddagen, terwijl in dezelfde maand een jaar later 520 graaddagen werden geteld. Uit de grafiek blijkt opnieuw dat in de laatste vijf jaren bovengemiddelde temperaturen zijn gemeten.

De gegevens uit de grafieken 3.1 tot en met 3.3 zijn in tabel 3.1 samengevat.

Tabel 3.1 Klimaatgegevens van het SEL-jaar, de jaren 1990 t/m 1994 en het langjarig gemiddelde over 1961-1990 voor De Bilt.

Table 3.1 Weatherdata for the SEL-year, the years 1990 up to 1994 and the longterm mean on the period 1961-1990 for De Bilt.

	aantal graaddagen per jaar		gemiddelde temperatuur		gemiddelde lichtsom	
	totaal	t.o.v. SEL %	°C	t.o.v. SEL °C	Jm ⁻² dag ⁻¹	t.o.v. SEL %
SEL	3195	-	9,4	-	915	-
1990	2678	84	10,9	1,5	999	109
1991	3163	99	9,5	0,1	946	103
1992	2821	88	10,5	1,1	978	107
1993	3077	96	9,6	0,2	903	99
1994	2834	89	10,6	1,2	925	101
langjarig	-	-	9,4	0,0	960	104

Uit tabel 3.1 blijkt dat de gemiddelde temperatuur in het SEL-jaar op jaarbasis gelijk is aan het langjarig gemiddelde. De jaren 1990 tot en met 1994 zijn qua temperatuur hoger dan zowel SEL als het langjarig gemiddelde.

Het aantal graaddagen was in 1990 het laagste en bedroeg 84% van het SEL-jaar.

De gemiddelde etmaaltemperatuur was met 9,4 °C in het SEL-jaar het laagste. De etmaaltemperatuur was in 1990 het hoogste en bedroeg 10,9 °C.

In vergelijking met de jaren '90 t/m '94 en met het langjarig gemiddelde leveren de weer-gegevens in het SEL-jaar een somber jaar. Alleen in 1993 had het met een gemiddelde lichtsom van 903 Jm⁻²dag⁻¹ nog ongeveer 1% minder instraling. In 1990 was de globale straling met 999 Jm⁻²dag⁻¹ het hoogste (9% meer dan in het SEL-jaar en 4% meer dan het langjarig gemiddelde).

4 Resultaten

4.1 Inleiding

Setpointinstellingen en bedrijfsuitrusting zijn van doorslaggevend belang in het gasverbruik van een tuinbouwkas. In dit hoofdstuk zullen de effecten van een drietal setpointinstellingen en een tweetal veranderingen in (het gebruik van) de bedrijfsuitrusting voor de drie belangrijkste groentegewassen worden bestudeerd. De setpointinstellingen betreffen stooktemperatuur, minimumbuistemperatuur en vochtgrens. Ten aanzien van bedrijfsuitrusting worden energieschermen en warmte-opslag bekeken. Warmte-opslag wordt daarbij in samenhang met CO₂-dosering geplaatst.

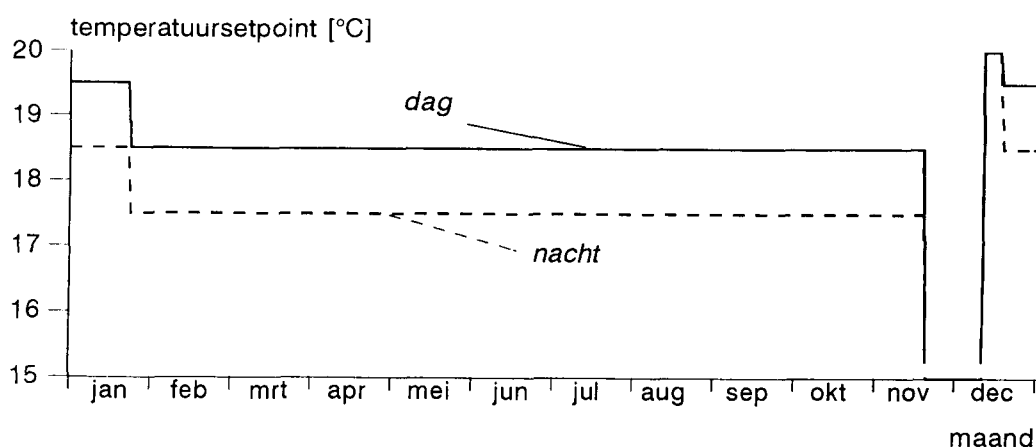
De gasverbruikseffecten zullen voorbeeldgewijs worden weergegeven voor tomaten, (§ 4.2), komkommers (§ 4.3) en paprika (§ 4.4). Elk van deze paragrafen kent eenzelfde opbouw. Hierin wordt eerst een uitgangssituatie vastgesteld, gevolgd door de genoemde wijzigingen op die uitgangssituatie en afgesloten met een overzicht voor het betreffende gewas.

In paragraaf 4.5 worden algemene conclusies uit de bestudeerde gasverbruiks-effecten getrokken.

4.2 Gasverbruikseffecten bij tomaten

4.2.1 Standaardbedrijfssituatie

De stooktemperatuur voor een tomatenteelt wordt door het jaar heen een aantal keren gewijzigd. Het verloop van de temperatuur-setpoints voor dag en nacht is in figuur 4.1 weergegeven. Het verloop is afgeleid uit kwantitatieve informatie (1995), tabel G135.



Figuur 4.1 Verloop stooktemperatuur van een tomatenteelt.

Figure 4.1 The course of air temperature setpoints for the growth of tomatoes.

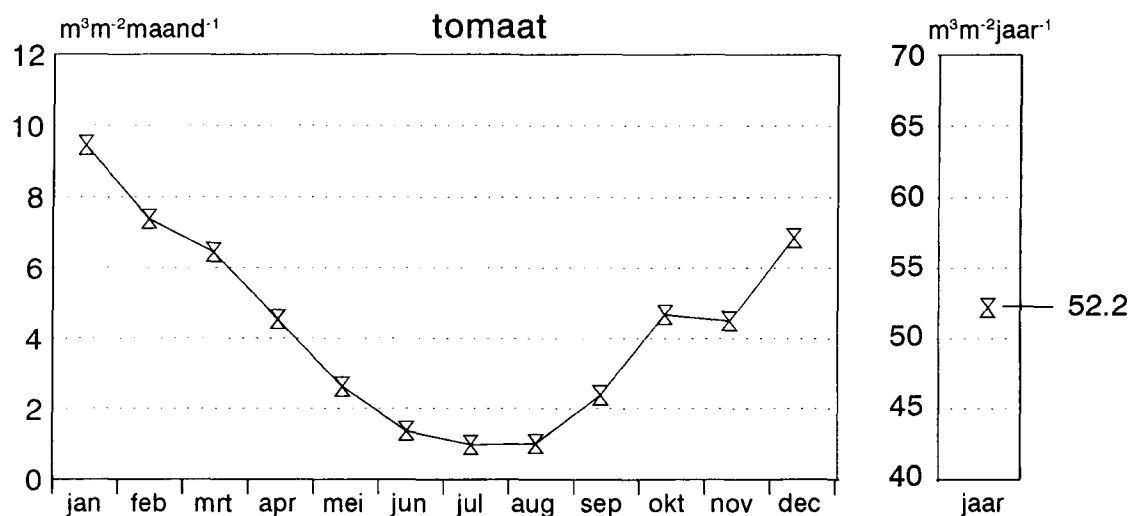
De wijzigingen in stooktemperatuur worden aangebracht op 11 december (planten), 18 december, 23 januari en 20 november. Op 20 november wordt de teelt beëindigd en wordt de kas 'koud gezet'. De stooktemperatuur wordt dan op 5 °C (niet op de schaal van figuur 4.1 afgebeeld) ingesteld.

Naast de stooktemperatuur zijn er nog een aantal andere instellingen waarvoor in de uitgangssituatie een waarde moet worden ingevuld. Deze zijn weergegeven in tabel 4.1.

Tabel 4.1 Bedrijfsuitrusting en klimaatregelaar-instellingen in de uitgangssituatie voor tomaat
Table 4.1 Utilities and climate controller settings in the reference situation for tomatoes

onderdeel	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
instelling	zie figuur 4.1	geen	80%	geen	bij warmtevraag	geen

In figuur 4.2 is het maandelijks en jaarlijkse aardgasverbruik dat KASPRO voor de uitgangssituatie berekent weergegeven. Het berekende jaarverbruik was 52 m³m⁻², wat een goed gemiddelde is voor de gasverbruiken die in *kwantitatieve informatie* (1995) voor de tomatenteelt worden gegeven (minimaal 45 m³m⁻²jaar⁻¹ en maximaal 62 m³m⁻²jaar⁻¹).



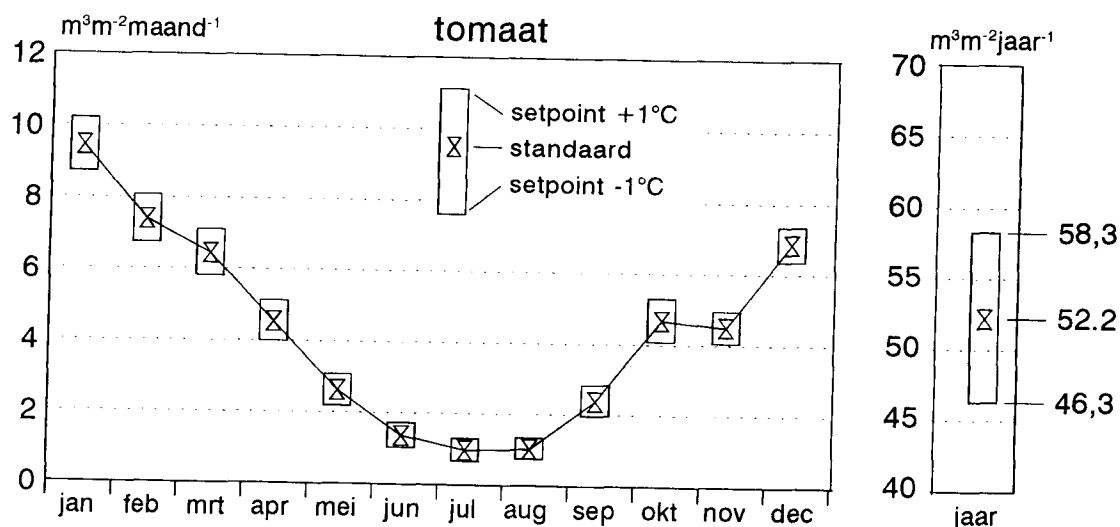
Figuur 4.2 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor de uitgangssituatie bij tomaat volgens het simulatiemodel.

Figure 4.2 Monthly and yearly gas consumption computed by the simulation model for the reference situation for tomatoes

4.2.2 Gasverbruik bij gewijzigde setpointinstellingen

4.2.2.1 Verandering van de stooktemperatuur

In figuur 4.3 is het gasverbruik weergegeven bij een 1 °C hogere stooktemperatuur en bij een 1 °C lagere.



Figuur 4.3 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor tomaten in de uitgangssituatie (getrokken lijn) en bij een 1 °C verhoogde en een 1 °C verlaagde stooktemperatuur.

Figure 4.3 Monthly and yearly gas consumption for tomatoes grown in the reference temperature regime (full curve) and in case the temperature setpoint is incremented or decremented 1 °C.

Op jaarbasis wordt bij tomaten voor een 1 °C hogere stooktemperatuur een verbruik van 58 m³m⁻² berekend (+6,2 m³, +12%). De verlaagde stooktemperatuur leidt tot een gasverbruik van 46 m³m⁻²jaar⁻¹ (-5,8 m³, -11%).

Opvallend is dat ook in de zomer nog aanzienlijke verschillen in het verbruik optreden.

4.2.2.2 Toepassen van minimumbuis

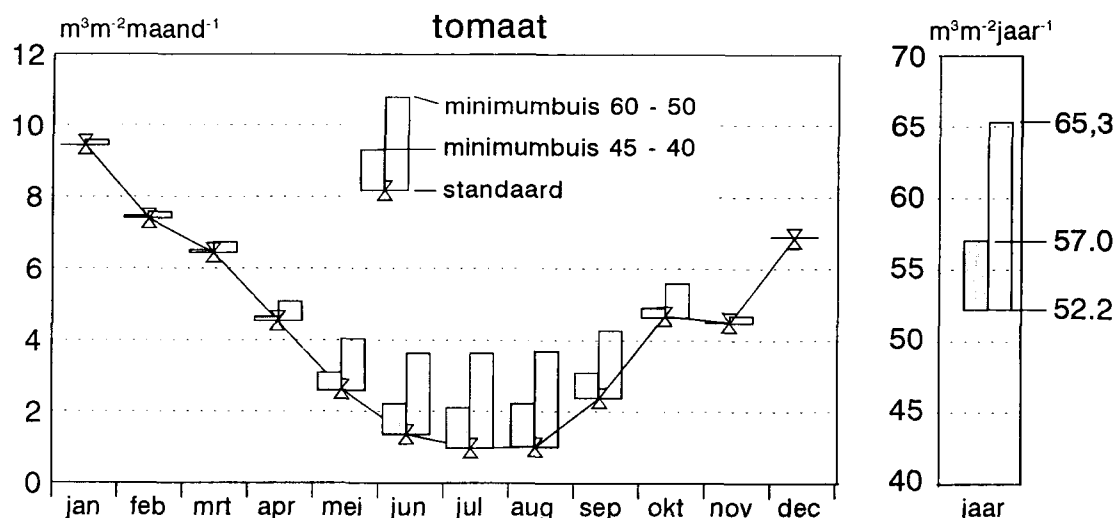
In de uitgangssituatie was geen minimumbuisregeling opgenomen. In deze paragraaf worden twee varianten met betrekking tot minimumbuisgebruik geëvalueerd. In de ene variant wordt overdag een minimumbuis van 45 °C en 's nachts een minimumbuis van 40 °C toegepast. In de andere variant zijn deze temperaturen respectievelijk 60 °C en 50 °C. Overdag wordt in beide varianten de minimumbuis lichtafhankelijk afgebouwd (zie § 3.2.3).

Tabel 4.2 Aangebrachte varianten in minimumbuis temperatuur.

Table 4.2 Evaluated alternatives with respect to minimum pipe temperature.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant 1	zie figuur 4.1	dag 45, nacht 40	80%	geen	bij warmtevraag	geen
variant 2	zie figuur 4.1	dag 60, nacht 50	80%	geen	bij warmtevraag	geen

De resultaten van de berekeningen zijn afgebeeld in figuur 4.4. Uit de figuur blijkt dat de 'lage' variant alleen in de zomer enig effect heeft, maar dat bij de 'hoge' variant ook in het voor- en najaar een effect kan worden waargenomen.



Figuur 4.4 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor tomaten in de uitgangssituatie en bij toepassing van minimumbuis. Variant 1 en 2 zijn gedefinieerd in tabel 4.2.

Figure 4.4 Reference monthly gas consumption and yearly total for tomatoes and for two minimum pipe applications. The definition of the situations is presented in table 4.2.

In de eerste variant stijgt het gasverbruik met 4,9 m³ naar ongeveer 57 m³m²jaar⁻¹ (+9%). De tweede variant geeft een veel grotere stijging te zien, namelijk 13,1 m³ naar 65 m³m²jaar⁻¹ (+25%).

4.2.2.3 Effect van verandering van de vochtgrens

Bij overschrijding van de vochtgrens gaat de kas in het simulatiemodel luchten met 2% raamopening per procent overschrijding (zie § 3.2.2). In figuur 4.5 wordt het gasverbruikseffect getoond van een verhoging en verlaging van de vochtgrens met 10%.

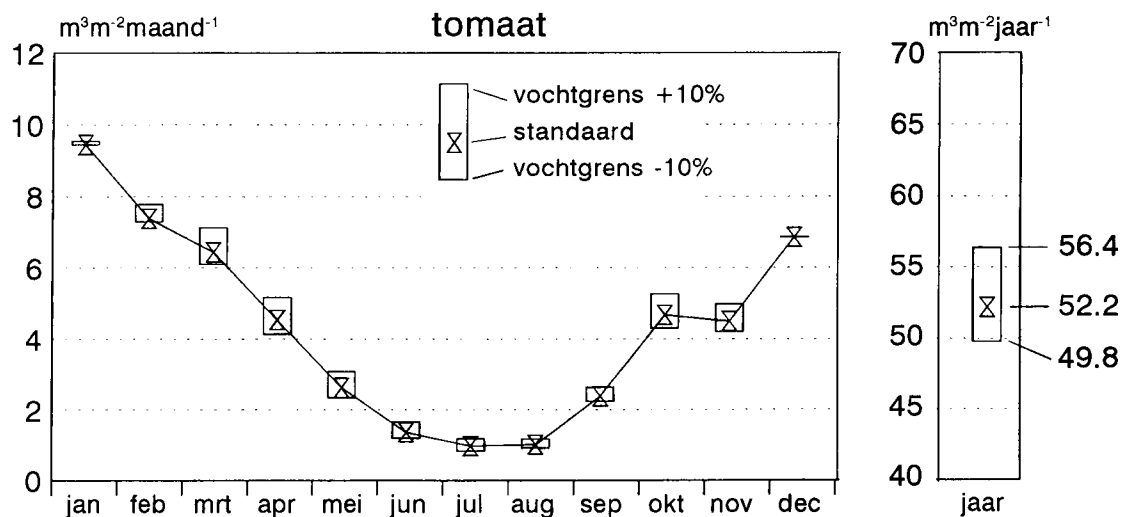
Tabel 4.3 Aangebrachte varianten in de vochtregeling.

Table 4.3 Evaluated alternatives with respect to humidity control.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant 1	zie figuur 4.1	geen	70%	geen	bij warmte	geen
variant 2	zie figuur 4.1	geen	90%	geen	bij warmte	geen

De resultaten van de berekeningen staan in figuur 4.5. Uit de figuur blijkt duidelijk dat de effecten in voor- en najaar het grootst zijn en in de winter erg klein. Het winter effect is klein omdat het gewas in eerste instantie klein is, en dus minder verdampt, en omdat een groot deel van het vocht wordt afgevoerd door condensatie tegen het koude kasdek.

Bij een luchtvochtigheidssetpoint van 90% daalt het gasverbruik op jaarbasis tot 50 m³/m² (-2,3 m³, -4%). Bij een verlaging van het vochtsetpoint naar 70% wordt het verbruik 56 m³/m² (+4,3 m³, +8%). Het effect van een verandering van de vochtgrens is dus sterk niet-lineair. Dit komt doordat bij een vochtsetpoint van 80% de ramen niet zo erg veel vaker geopend zullen worden dan wanneer het vochtsetpoint 90% is doordat condensatie van vocht tegen het kasdek de RV al behoorlijk drukt. Bij een verlaging van het setpoint richting 70% gaat het (energieverbruiksbeperkende) condensatie-mechanisme steeds minder bijdragen zodat het energieverbruik snel toeneemt.



Figuur 4.5 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor tomaten in de uitgangssituatie en bij verandering van de vochtgrens waarboven de klimaatregelaar de ramen opent.

Figure 4.5 Reference monthly and yearly gas consumption for tomatoes and after changing the humidity setpoint

4.2.2.4 Effect van een energiescherm

In de tomatenteelt wordt op de meeste bedrijven geen energiescherm gebruikt. Om het gasverbruikseffect aan te geven indien dit wel zou worden toegepast is een modelberekening gemaakt waarbij een vochtdoorlatend, beweegbaar scherm wordt toegepast (zie §3.2.1). Het scherm wordt gesloten als de buitentemperatuur in de nacht onder de 5 °C zakt. Een gesloten scherm werd bij zonsopgang weer geopend.

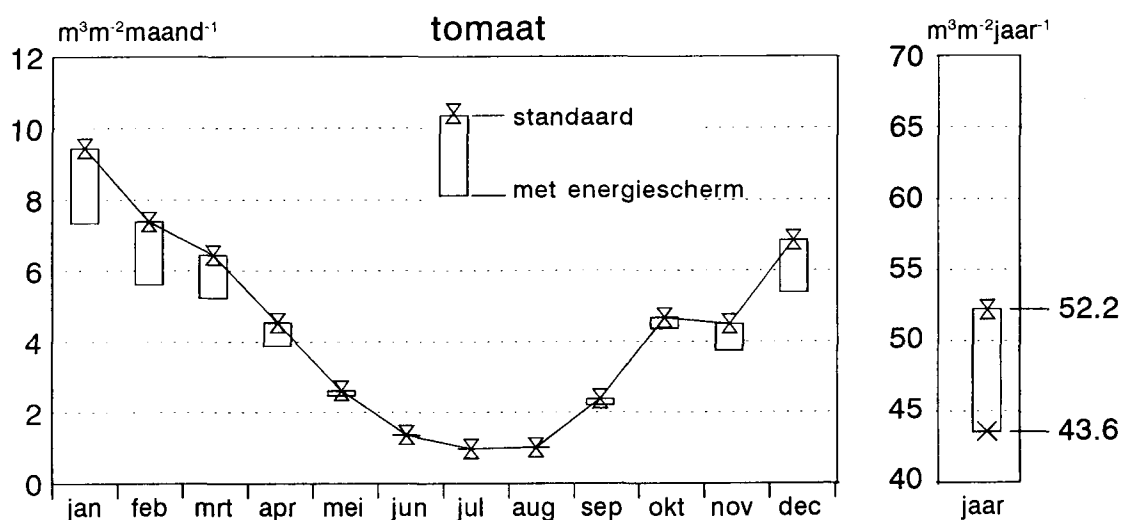
In figuur 4.6 is het gasverbruik van de situatie met een scherm weergegeven tegen de achtergrond van de uitgangssituatie.

Uit de figuur blijkt dat schermen in de winter een belangrijke brandstofbesparing levert. In voor- en najaar is het voordeel beperkt en in de zomer is uiteraard geen winst te behalen. In de simulatie werd het gasverbruik op jaarbasis teruggebracht tot 44 m³/m² (-8,6 m³, -16%).

Tabel 4.4 De toepassing van een energiescherm

Table 4.4 Application of a thermal screen

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant	zie figuur 4.1	geen	80%	's nachts als kouder dan 5 °C	bij warmtevraag	geen



Figuur 4.6 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor tomaten in de uitgangssituatie en bij toepassing van een energiescherm.

Figure 4.6 Reference monthly and yearly gas consumption for tomatoes and by application of a thermal screen.

4.2.2.5 Gasverbruik bij CO₂-dosering en warmte-opslag

In de uitgangssituatie wordt alleen CO₂ gedoseerd bij warmtevraag. Bij de bestudering van het effect van CO₂-dosering en warmte-opslag op het energieverbruik wordt de doseringsstrategie veranderd. In deze paragraaf wordt er namelijk van uitgegaan dat CO₂-dosering plaatsvindt vanaf zonsopgang tot een uur voor zonsondergang, ongeacht de warmtevraag. Warmte-overschotten worden in de buffer opgeslagen, totdat de buffer vol is. Daarna worden de warmte-overschotten afgelucht (=warmtevernietiging).

In de simulaties worden twee doseersnelheden toegepast (de verbranding van 60 en 100 m³ aardgas per ha per uur) en, naast een referentie-situatie zonder buffer, twee bufferafmetingen (50 en 100 m³ha⁻¹).

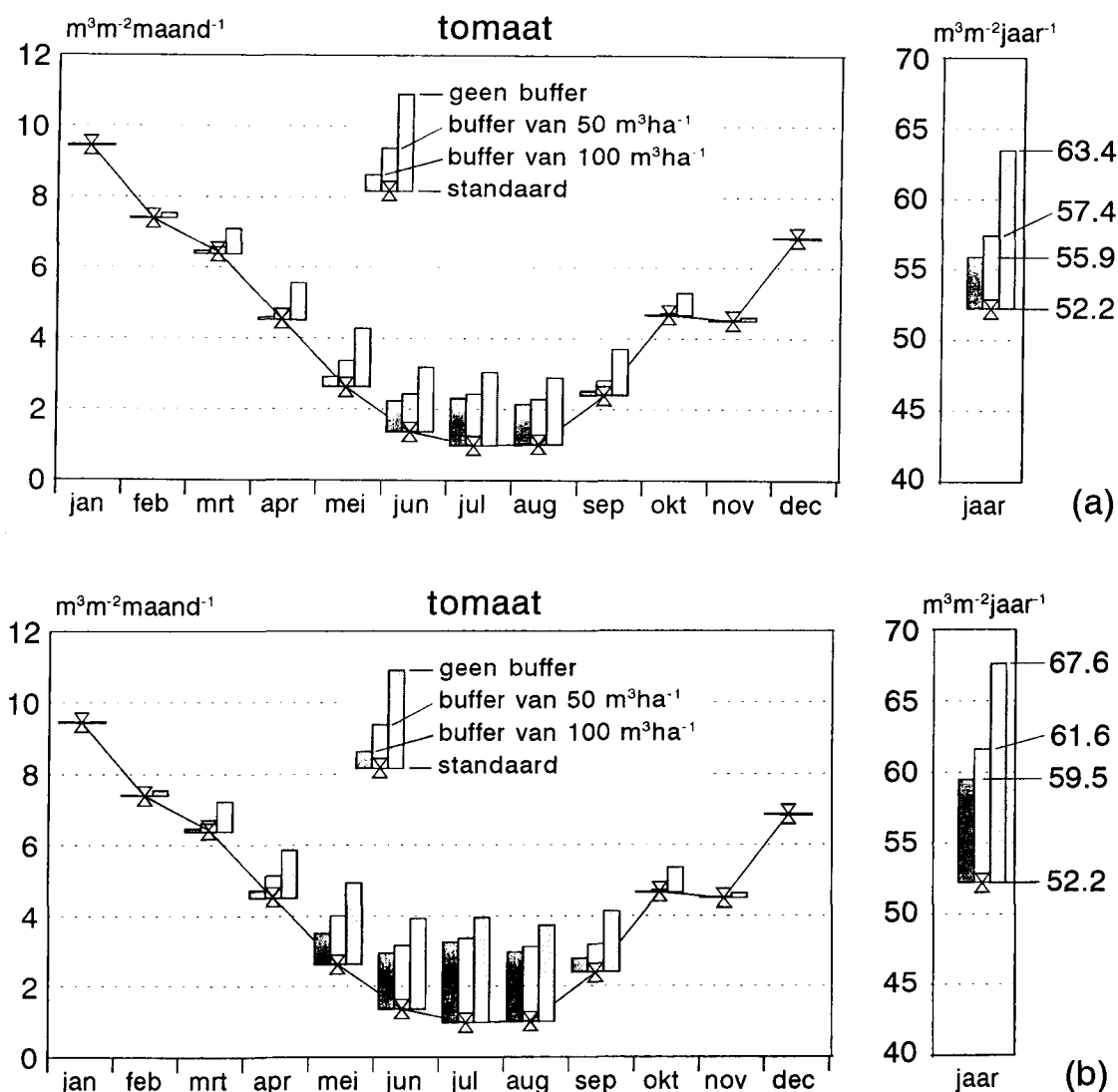
Tabel 4.5 Aangebrachte varianten met betrekking tot CO₂-dosering en warmte-opslag capaciteit.

Table 4.5 Evaluated alternatives with respect to CO₂-supply and heat storage capacity.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
set 1	zie figuur 4.1	geen	80%	geen	60 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	0 m ³ ha ⁻¹ 50 m ³ ha ⁻¹ 100 m ³ ha ⁻¹
set 2	zie figuur 4.1	geen	80%	geen	100 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	0 m ³ ha ⁻¹ 50 m ³ ha ⁻¹ 100 m ³ ha ⁻¹

De resultaten voor de lage doseersnelheid zijn weergegeven in figuur 4.7a. De resultaten voor de hoge doseersnelheid staan in figuur 4.7b. Als er geen buffer is blijkt het extra gasverbruik door de CO₂-dosering erg groot (11,2 en 15,4 m³ voor respectievelijk de doseersnelheid van 60 en van 100 m³ha⁻¹uur⁻¹ (21% en 30%)). Ondanks een grote buffer blijft het extra verbruik ten opzichte van de referentie situatie echter nog altijd fors (3,7 en 7,3 m³ (7% en 14%)). Blijkbaar is er vaak sprake van een structureel warmte-overschot en moet er, met name bij de hoge doseersnelheid, een grote hoeveelheid warmte worden vernietigd.

De resultaten laten duidelijk afnemende meer-besparingen zien.



Figuur 4.7 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor tomaten in de uitgangssituatie en bij toepassing van CO₂-dosering ongeacht de warmtevraag voor drie bufferafmetingen (0, 50 en 100 m³ ha⁻¹). CO₂-dosering vindt plaats van zonsopkomst tot een uur voor zonsondergang zolang de CO₂-concentratie onder de 600 ppm blijft. In (a) is de doseersnelheid 60 m³ aardgas per ha per uur en in (b) 100 m³ aardgas per ha per uur.

Figure 4.7 Reference monthly and yearly gas consumption for tomatoes and by application CO₂-supply irrespective the heat demand for three heat storage tank dimensions (0, 50 and 100 m³ ha⁻¹). CO₂ is supplied from sunrise till one hour before sunset as long as the CO₂ concentration does not exceed 600 ppm. In (a) the supply rate is 60 m³ ha⁻¹ hr⁻¹ and in (b) 100 m³ ha⁻¹ hr⁻¹.

4.2.3 Conclusies voor de tomatenteelt

In tabel 4.7 zijn de resultaten van de doorgerekende varianten op een rijtje gezet. Uit de tabel blijkt dat, van de alternatieven die zijn doorgerekend, het gebruik van een hoge minimumbuis temperatuur en CO₂-dosering het energie-verbruik sterk verhogen. De toepassing van een energiescherm levert een aanzienlijke vermindering van het gasverbruik. Het effect van een verhoging van het temperatuur-setpoint is ook groot. Het verhogen van de vochtgrens geeft maar een kleine vermindering van het energieverbruik

omdat de instelling voor de vochtgrens in de referentiesituatie al vrij hoog ligt. De verlaging van vochtgrens geeft een aanzienlijke verhoging van het energieverbruik te zien (+8%).

Tabel 4.6 Absolute en relatieve energieverbruikseffecten van veranderingen in de kasklimaatregelaar setpoints en de bedrijfsuitrusting voor tomaat in vergelijking met een uitgangssituatie die in paragraaf 4.2.1 is gedefinieerd.

Table 4.6 *Absolute and relative energy consumption effects of alternative climate controller settings and greenhouse utilities for tomatoes, compared to the reference situation described in section 4.3.3.*

	varianten	jaarverbruik m ³ m ²	effect m ³ m ²	relatief
uitgangssituatie	-	52,2	-	-
temperatuureffect	+1 °C	58,3	+6,2	+12%
	-1 °C	46,3	-5,8	-11%
minimumbuiseffect	45 - 40	57,0	+4,9	+9%
	60 - 50	65,3	+13,1	+25%
vochtgrens	+10%	49,8	-2,3	-4%
	-10%	56,4	+4,3	+8%
plaatsing energiescherm		43,6	-8,6	-16%
CO ₂ -dosering 60 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	buffer 0 m ³ ha ⁻¹	63,4	+11,2	+21%
	50 m ³ ha ⁻¹	57,4	+5,2	+10%
	100 m ³ ha ⁻¹	55,9	+3,7	+7%
CO ₂ -dosering 100 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	buffer 0 m ³ ha ⁻¹	67,6	+15,4	+30%
	50 m ³ ha ⁻¹	61,6	+9,4	+18%
	100 m ³ ha ⁻¹	59,5	+7,3	+14%

Het beperkte effect van de warmte-opslagtank wordt veroorzaakt doordat de kas in de referentie-situatie in de zomer maar een beperkte warmtevraag heeft (geen minimumbuis-temperatuur) zodat bij een hoge doseersnelheid al gauw een structureel warmte-overschot ontstaat. Bij gewassen die in de zomer een hoger etmaalverbruik hebben, zal dit anders liggen (zie §4.3.3).

Het maximale buffereffect in de tomatenteelt is 8.1 m³m²jaar⁻¹ (een buffer van 100 m³ in vergelijking met geen buffer bij een CO₂-doseersnelheid van 100 m³ha⁻¹uur⁻¹).

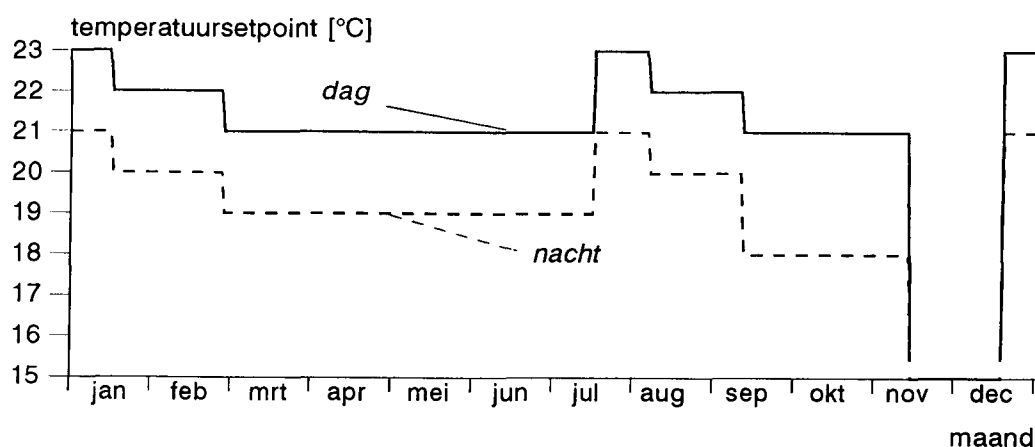
4.3 Gasverbruikseffecten bij komkommers

4.3.1 Standaardbedrijfssituatie

De stooktemperatuur voor de komkommer met twee teelten per jaar wordt door het jaar heen een aantal keren gewijzigd. Het verloop is in figuur 4.8 weergegeven. Het setpointverloop is opgesteld naar aanleiding van gegevens in *kwantitatieve informatie* (1995).

De wijzigingen in stooktemperatuur die uit figuur 4.8 blijken worden aangebracht op 18 december (planten), 16 januari, 27 februari, 17 juli (2^e keer planten), 7 augustus, 11 september en 13 november. De tweede teelt wordt op 13 november beëindigd. Het temperatuurssetpoint wordt dan op 5 °C ingesteld.

Naast de stooktemperatuur zijn er nog een aantal andere instellingen waarvoor in de uitgangssituatie een waarde moet worden ingevuld. Deze zijn weergegeven in tabel 4.7



Figuur 4.8 Verloop stooktemperatuur van een komkommerteelt.

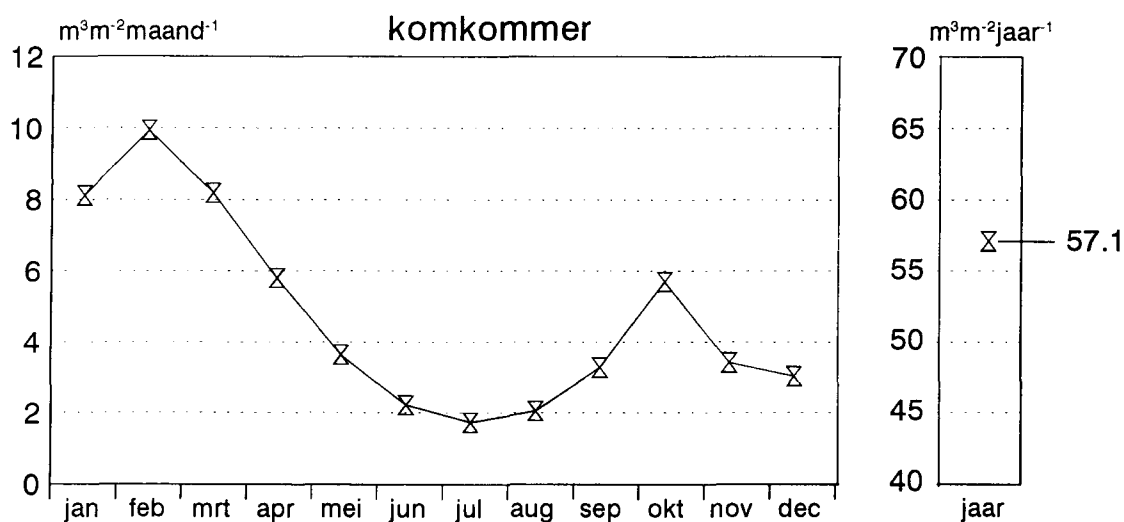
Figure 4.8 The course of air temperature setpoints for the growth of cucumber.

Tabel 4.7 Bedrijfsuitrusting en klimaatregelaar instellingen in de uitgangssituatie voor komkommer

Table 4.7 Utilities and climate controller settings in the reference situation for cucumber

onderdeel	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
instelling	zie figuur 4.8	geen	80%	18-12 tot 16-01: vast scherm daarbuiten: geen scherm	bij warmte- vraag	geen

In figuur 4.9 wordt het maandelijks aardgasverbruik afgebeeld dat KASPRO voor de komkommerteelt met de gegeven setpointinstellingen en bedrijfssituatie berekent. Het jaarverbruik is 57,1 m³m⁻². Hiermee ligt het berekende gasverbruik iets onder de 58,9 m³m⁻²jaar⁻¹ die in *kwantitatieve informatie* (1995) wordt genoemd (KWIN, tabel G51).



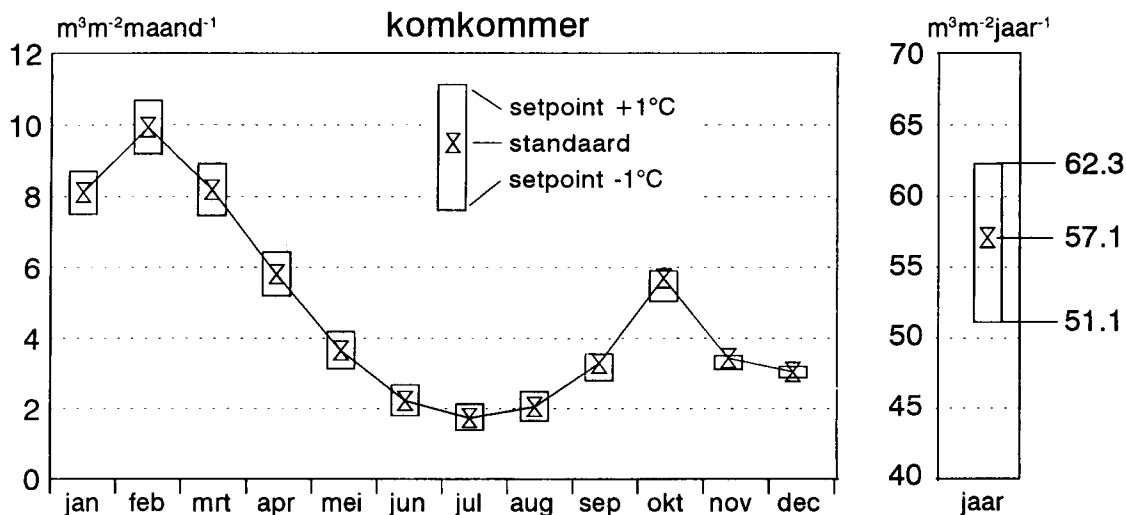
Figuur 4.9 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor de uitgangssituatie bij komkommer volgens het simulatiemodel.

Figure 4.9 Monthly and yearly gas consumption computed by the simultion model for the reference situation for cucumber

4.3.2 Gasverbruik bij gewijzigde setpointinstellingen

4.3.2.1 Verandering van de stooktemperatuur

In figuur 4.10 is het aardgasverbruik weergegeven bij een 1 °C hoger en 1 °C lager setpoint voor de kasluchttemperatuur.



Figuur 4.10 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor een komkommernewas (twee teelten) in de uitgangssituatie (getrokken lijn) en bij een 1 °C verhoogde en een 1 °C verlaagde stooktemperatuur.

Figure 4.10 Monthly and yearly gas consumption for cucumber grown in the reference temperature regime (full curve) and in case the temperature setpoint is incremented or decremented 1 °C.

Op jaarbasis wordt door het model voor de komkommer bij een 1 °C hogere stooktemperatuur een verbruik van 62 m³m⁻² berekend (+5,2 m³, +9%). De verlaagde stooktemperatuur leidt tot een gasverbruik van 51 m³m⁻²jaar⁻¹ (-6,0 m³, -10%). De effecten van een veranderd temperatuursetpoint zijn bij de komkommer kleiner dan die bij de tomaat omdat bij de komkommer aan het begin van de teelt een vast scherm wordt gebruikt.

4.3.2.2 Toepassing van minimumbuis

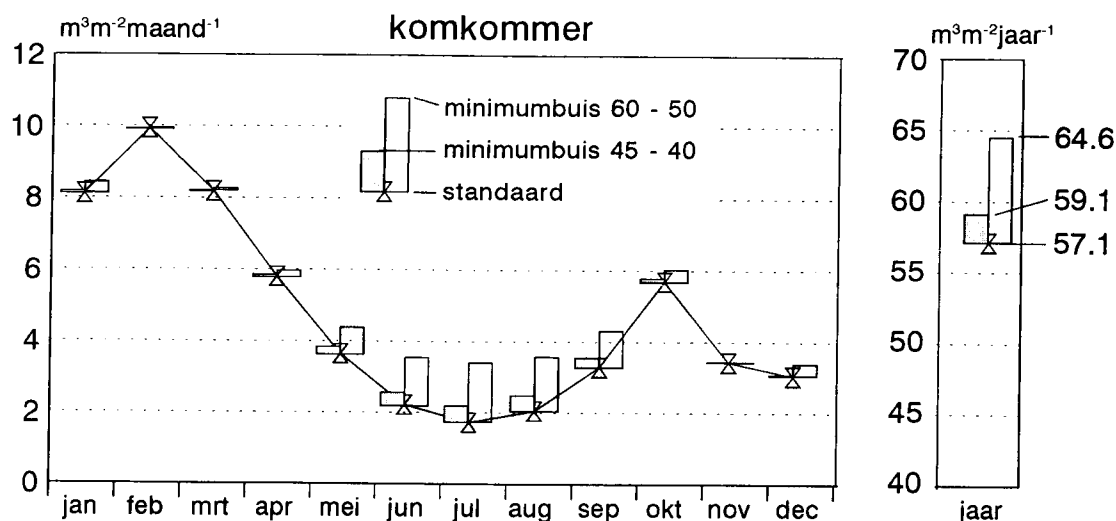
In de uitgangssituatie was geen minimumbuisregeling opgenomen. In deze paragraaf wordt het effect van een 'lage' minimumbuis temperatuur (45 °C overdag en 40 °C 's nachts) en een 'hoge' variant (60 °C overdag en 50 °C 's nachts) ten opzichte van de uitgangssituatie getoond. Overdag wordt in beide varianten de minimumbuis lichtafhankelijk afgebouwd (zie § 3.2.3). In tabel 4.8 zijn de bestudeerde effecten kort weergegeven.

Tabel 4.8 Aangebrachte varianten in minimumbuis temperatuur

Table 4.8 Evaluated alternatives with respect to minimum pipe temperature

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant 1	zie figuur 4.8	45 dag, 40 nacht	80%	zie tabel 4.7	bij warmtevraag	geen
variant 2	zie figuur 4.8	60 dag, 50 nacht	80%	zie tabel 4.7	bij warmtevraag	geen

De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.11. Het effect van de lage minimumbuis temperatuur bleef beperkt tot slechts 2 m³ (3%) en gaf alleen in de zomermaanden (juni t/m september) een kleine verhoging van het maandverbruik te zien. De 'hoge' minimumbuis variant verhoogde het gasverbruik met 7,5 m³ tot 65 m³m⁻²jaar⁻¹ (+13%). Ook hier kwam het effect vooral in de zomer tot uiting, maar kon in het voor- en najaar ook nog enig effect worden waargenomen.



Figuur 4.11 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor komkommer in de uitgangssituatie en bij toepassing van minimumbuis. Variant 1 en 2 zijn gedefiniëerd in tabel 4.8.

Figure 4.11 Reference monthly gas consumption and yearly total for cucumber and for two minimum pipe applications. The definition of the situations is presented in table 4.8.

4.3.2.3 Verandering van de vochtgrens

Bij verandering van de vochtgrens gaat de kas vaker (vochtgrens omlaag) of minder vaak (vochtgrens omhoog) luchten op vocht. Het gasverbruikseffect hiervan bij een komkommerteelt wordt getoond in figuur 4.12. De vochtgrens is daarbij beurtelings verhoogd naar 90% en verlaagd naar 70%.

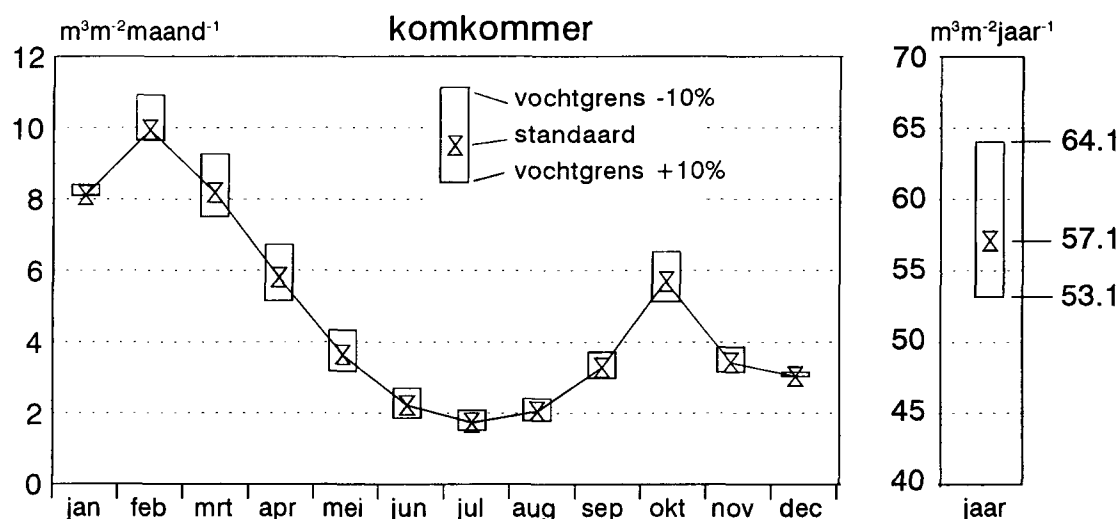
Tabel 4.9 Aangebrachte varianten in de vochtregeling.

Table 4.9 Evaluated alternatives with respect to humidity control.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant 1	zie figuur 4.8	geen	70%	zie tabel 4.7	bij warmtevraag	geen
variant 2	zie figuur 4.8	geen	90%	zie tabel 4.7	bij warmtevraag	geen

Uit figuur 4.12 blijkt dat de wijziging van de vochtgrens gedurende het grootste deel van het jaar een aanzienlijk effect heeft op het gasverbruik. In december en januari is het effect klein omdat voor allebei die maanden de helft van de periode een vast scherm wordt gebruikt. Omdat verondersteld is dat een vast scherm een vochtregeling uitsluit is gedurende de tweede helft van december en de eerste helft van januari het energieverbruikseffect van de vochtgrens 0. In de andere delen van deze maanden is het effect klein omdat door condensatie de noodzaak de ramen te openen om vocht af te voeren gering is. Op jaarbasis leidt een verhoging van de vochtgrens naar 90% tot een vermindering van het gasverbruik naar 53 m³m⁻²jaar⁻¹

(-4 m³, -7%). Een verlaging van de vochtgrens naar 70% drijft het gasverbruik op naar 64 m³m⁻²jaar⁻¹ (7 m³, 12%).



Figuur 4.12 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor komkommer in de Ausgangssituatie en bij verandering van de vochtgrens waarboven de klimaatregelaar de ramen opent.

Figure 4.12 Reference monthly and yearly gas consumption for cucumber and after changing the humidity setpoint

4.3.2.4 Verandering van schermtype

In de Ausgangssituatie voor de komkommerteelt wordt in december en januari gebruik gemaakt van een vast scherm. Een beweegbaar scherm kan echter over een veel langere periode worden gebruikt en kan daardoor een energiebesparend effect geven.

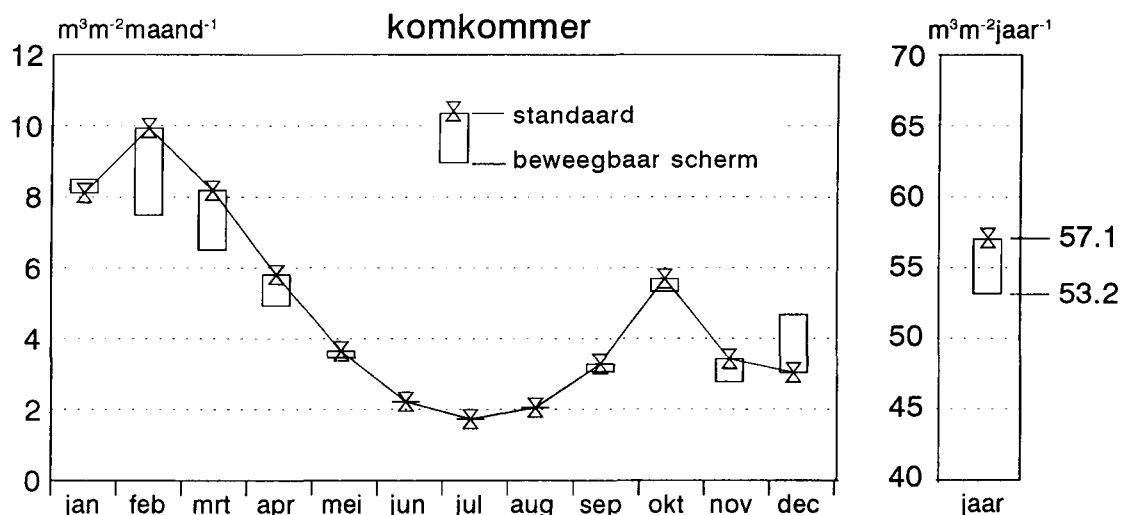
In deze paragraaf wordt het vaste scherm vervangen door een beweegbaar scherm dat gesloten wordt als het buiten kouder is dan 5 °C en de globale straling minder is dan 30 W/m². In tegenstelling tot het scherm bij de tomaten, wordt in de komkommerteelt het scherm ook overdag gebruikt.

Tabel 4.10 Klimaatregelaarinstellingen voor de komkommerteelt met een beweegbaar scherm.

Table 4.10 Climate controller settings holding for the simulation on the energy consumption of a cucumber canopy with a movable thermal screen.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant	zie figuur 4.8	geen	80%	dag en nacht als kouder dan 5 °C en globale straling < 30 W/m ²	bij warmtevraag	geen

In figuur 4.13 is het gasverbruik weergegeven, indien op bovengenoemde wijze gebruik wordt gemaakt van een energiescherm. Het doek is vochtdoorlatend verondersteld (zie §3.2.1).



Figuur 4.13 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor komkommer in de uitgangssituatie (waarbij een vast scherm wordt gebruikt van 18-12 tot 16-01) en bij toepassing van een beweegbaar scherm.

Figure 4.13 Reference monthly and yearly gas consumption for cucumber (using a fixed screen from 18-12 till 16-01) and by application of a movable thermal screen.

Het gebruik van een beweegbaar scherm levert gedurende de eerste vier weken (die half in december en half in januari vallen) een verhoging van het gasverbruik. Dit komt door de vochtdoorlatendheid van het scherm en het feit dat het scherm overdag vaak openloopt. In de andere maanden wordt echter een besparing gerealiseerd. De besparing ligt vooral in de maanden februari t/m april. Op jaarbasis wordt het gasverbruik teruggebracht tot 53 m³m⁻²jaar⁻¹ (-3,9 m³, -7%).

4.3.2.5 CO₂-dosering en warmte-opslag

Net als bij de tomaat is de doseringsstrategie voor de bepaling van het effect van CO₂-dosering en warmte-opslag veranderd ten opzichte van de uitgangssituatie. In deze paragraaf wordt er namelijk van uitgegaan dat CO₂-dosering plaatsvindt vanaf zonsopgang tot een uur voor zonsondergang, ongeacht de warmtevraag. Warmte-overschotten worden in de buffer opgeslagen, totdat de buffer vol is. Daarna worden de warmte-overschotten afgelucht (en wordt er dus warmte vernietigd).

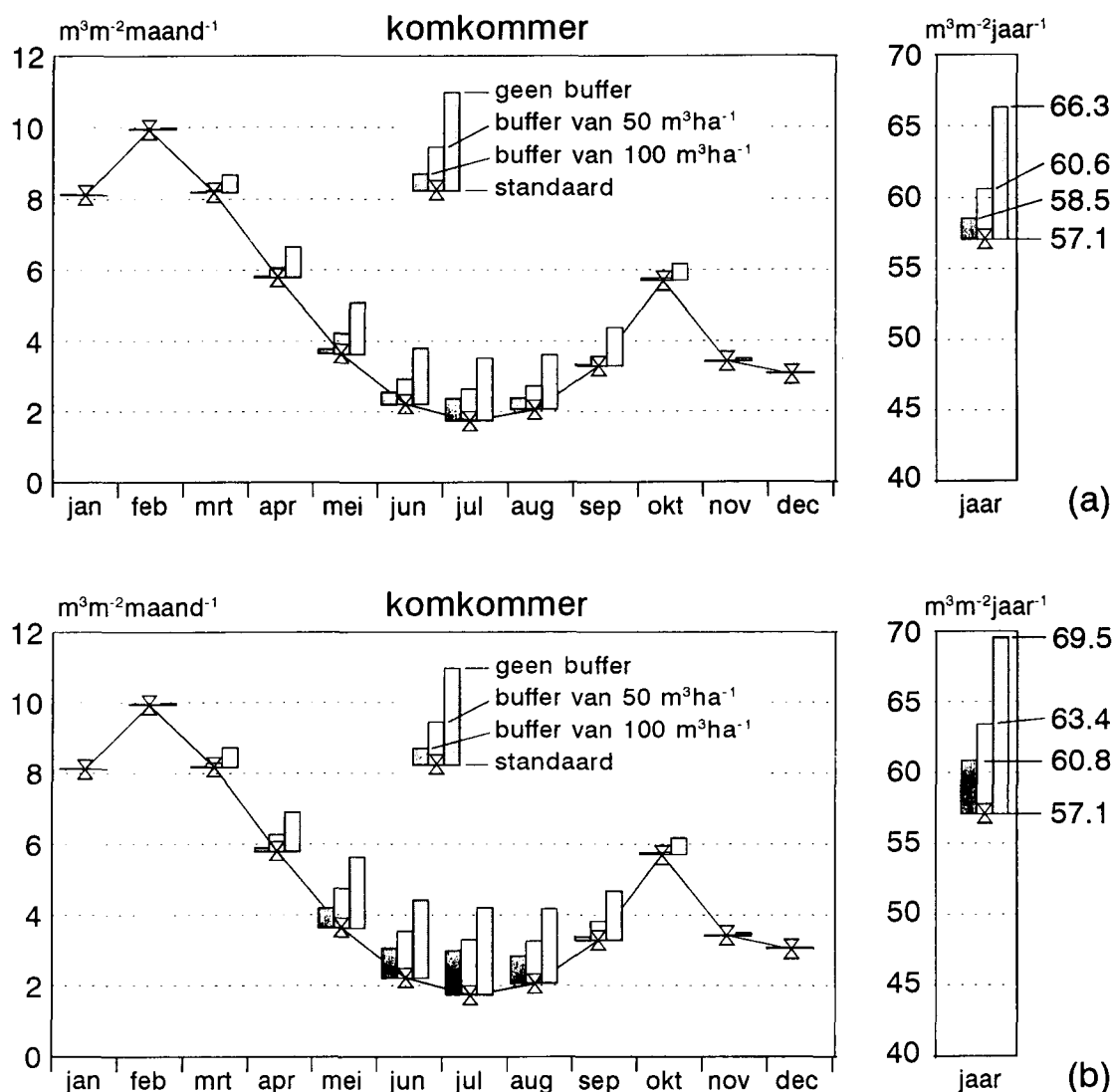
In de simulaties worden twee doseersnelheden toegepast (60 en 100 m³ aardgas per ha per uur) en, naast een referentie-situatie zonder buffer, twee bufferafmetingen (50 en 100 m³ha⁻¹).

De resultaten voor de lage doseersnelheid zijn weergegeven in figuur 4.14a. De resultaten voor de hoge doseersnelheid staan in figuur 4.14b.

Tabel 4.11 Aangebrachte varianten met betrekking tot CO₂-dosering en warmte-opslag capaciteit.

Table 4.11 Evaluated alternatives with respect to CO₂-supply and heat storage capacity.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
set 1	zie figuur 4.8	geen	80%	zie tabel 4.7	60 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	0 m ³ ha ⁻¹ 50 m ³ ha ⁻¹ 100 m ³ ha ⁻¹
set 2	zie figuur 4.8	geen	80%	zie tabel 4.7	100 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	0 m ³ ha ⁻¹ 50 m ³ ha ⁻¹ 100 m ³ ha ⁻¹



Figuur 4.14 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor komkommer in de uitgangssituatie en bij toepassing van CO₂-dosering ongeacht de warmtevraag voor drie buffer-afmetingen (0, 50 en 100 m³ha⁻¹). CO₂-dosering vindt plaats van zon-opkomst tot een uur voor zon-sondergang zolang de CO₂-concentratie onder de 600 ppm blijft. In (a) is de doseersnelheid 60 m³ha⁻¹uur⁻¹ en in (b) 100 m³ha⁻¹uur⁻¹.

Figure 4.14 Reference monthly and yearly gas consumption for cucumber and by application CO₂-supply irrespective the heat demand for three heat storage tank dimensions (0, 50 and 100 m³ha⁻¹). CO₂ is supplied from sunrise till one hour before sunset as long as the CO₂ concentration does not exceed 600 ppm. In (a) the supply rate is 60 m³ha⁻¹hr⁻¹ and in (b) 100 m³ha⁻¹hr⁻¹.

Zonder buffer is het extra gasverbruik bij de doseersnelheid van $60 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{uur}^{-1}$ $9,2 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (16%). De toepassing van een buffer van $50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ verlaagt dit extra verbruik naar $3,5 \text{ m}^3$. Met de toepassing van een buffer van 100 m^3 wordt het extra verbruik $1,2 \text{ m}^3$ (2%). Bij de doseersnelheid van $100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{uur}^{-1}$ is de stijging van het gasverbruik zonder buffer $12,4 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (22%). Hier verlaagt de buffer van $50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ het extra verbruik tot $6,3$ en de buffer van $100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ beperkt het extra verbruik tot $3,7 \text{ m}^3$ (7%).

Ook hier zijn duidelijk de afnemende meer-besparingen te zien. In vergelijking met de tomaat zijn de extra verbruiken minder en is het buffer-effect groter. Beide verschillen komen voort uit de grotere warmtevraag van de komkommerteelt, waarbij het verminderde extra-verbruik voortkomt uit de hogere warmtebehoefte overdag en het grotere buffer-effect uit de hogere warmte-behoefte in de nacht.

Het maximale buffereffect in de komkommerteelt is $8,7 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (een buffer van 100 m^3 in vergelijking met geen buffer bij een CO_2 -doseersnelheid van $100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{uur}^{-1}$) en daarmee iets groter dan het maximale effect in de tomatenteelt.

4.3.3 Conclusies voor de komkommerteelt

In tabel 4.12 worden de resultaten van de doorgekende varianten in de komkommerteelt getoond. De effecten van temperatuurveranderingen zijn vergelijkbaar met de effecten die in de tomatenteelt werden gevonden. De minimumbuis- en CO_2 -dosering en buffereffecten zijn door de hogere warmtevraag van de komkommerteelt zowel absoluut als relatief kleiner dan bij de tomaat. Het effect van vochtgrens is bij de komkommer een stuk groter. Dit komt doordat, als gevolg van de hogere kasluchttemperatuur het warmteverlies bij het luchten op vocht groter is dan in de tomatenteelt. Het effect van het energiescherm is kleiner doordat in de referentie ook al een scherm wordt gebruikt (zie tabel 4.7).

Tabel 4.12 Absolute en relatieve energieverbruikseffecten van veranderingen in de kasklimaatregelaar-setpoints en de bedrijfsuitrusting in vergelijking met een uitgangssituatie voor komkommer.

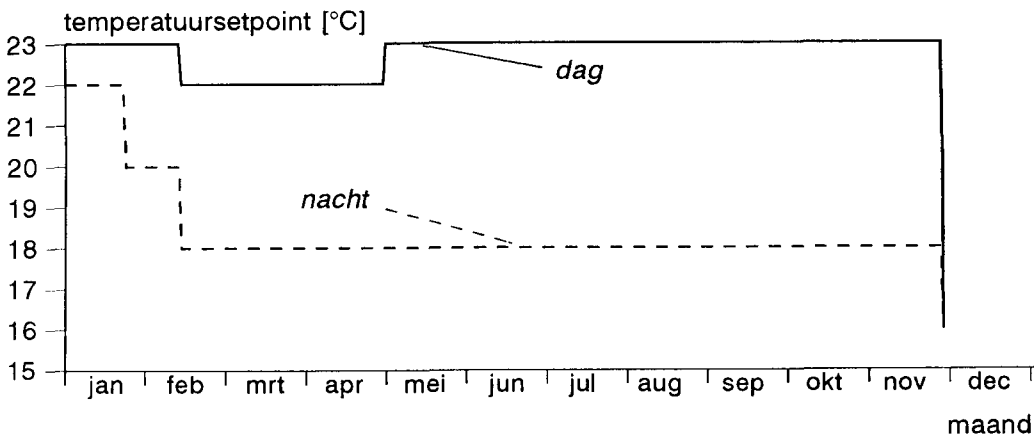
Table 4.12 Absolute and relative energy consumption effects of alternative climate controller settings and greenhouse utilities compared to a reference situation for cucumber.

	varianten	jaarverbruik m^3m^{-2}	effect m^3m^{-2}	relatief
uitgangssituatie	-	57,1	-	-
temperatuureffect	+1 °C	62,3	+5,2	+9%
	-1 °C	51,1	-6,0	-10%
minimumbuiseffect	45 - 40	59,1	+2,0	+3%
	60 - 50	64,6	+7,5	+13%
vochtgrens	+10%	53,1	-4,0	-7%
	-10%	64,1	+7,0	+12%
plaatsing energiescherm		53,2	-3,9	-7%
CO_2 -dosering $60 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{uur}^{-1}$	buffer $0 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$	66,3	+9,2	+16%
	$50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$	60,6	+3,5	+6%
	$100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$	58,5	+1,4	+2%
CO_2 -dosering $100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{uur}^{-1}$	buffer $0 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$	69,5	+12,4	+22%
	$50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$	63,4	+6,3	+11%
	$100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$	60,8	+3,7	+7%

4.4 Gasverbruikseffecten bij paprika

4.4.1 Standaardbedrijfssituatie

De stooktemperatuur voor een paprikateelt is in onderstaande figuur weergegeven. Het setpointverloop is opgesteld naar aanleiding van *kwantitatieve informatie* (1995).



Figuur 4.15 Verloop stooktemperatuur van een paprikateelt.

Figure 4.15 The course of air temperature setpoints for the growth of sweet pepper.

De data waarop de instellingen worden gewijzigd zijn 2 januari (planten), 23 januari, 13 februari, 1 mei en 27 november. Op 27 november wordt de teelt beëindigd. Tot de nieuwe teelt wordt de stooktemperatuur dan op 5 °C ingesteld.

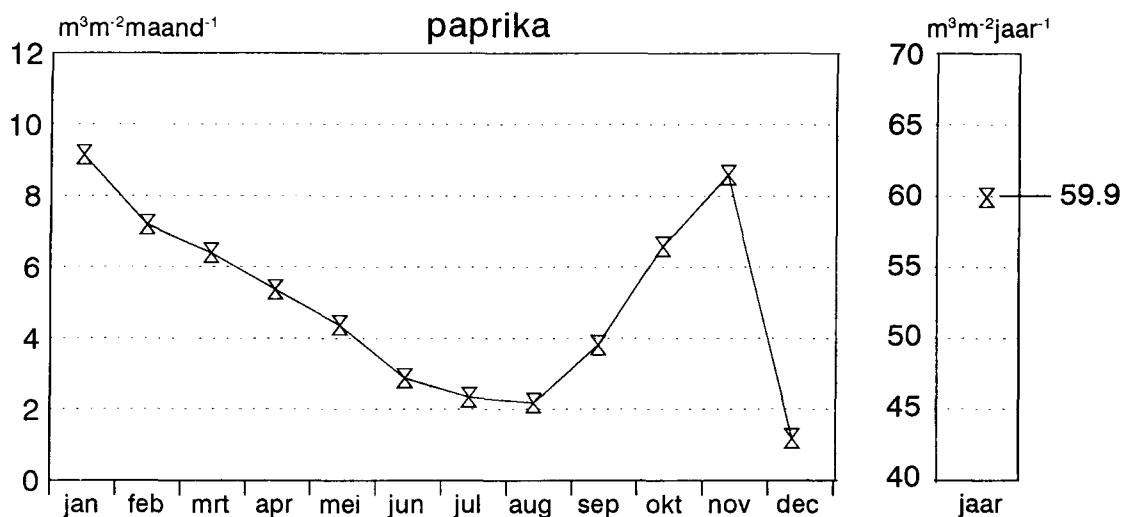
De overige instellingen zijn opgenomen in tabel 4.13. Daarbij is vooral het schermgebruik wat ingewikkelder dan voor de andere twee gewassen.

Tabel 4.13 Bedrijfsuitrusting en klimaatregelaarinstellingen in de uitgangssituatie voor paprika

Table 4.13 Utilities and climate controller settings in the reference situation for sweet pepper

onderdeel	temperatuur	minimumbuis	vocht	scherm	CO ₂ -dose	buffer
instelling	zie figuur 4.15	geen	80%	02-01 tot 23-01: dag en nacht als < 5°C en straling <30 W/m ² 23-01 tot 01-05: 's nachts als < 5°C daarbuiten: geen scherm	bij warmte- vraag	geen

Figuur 4.16 toont het maandelijks gasverbruik bij paprika dat door KASPRO is berekend bij de bovenstaande standaardinstellingen. Het jaarverbruik kwomt op 60 m³m⁻².

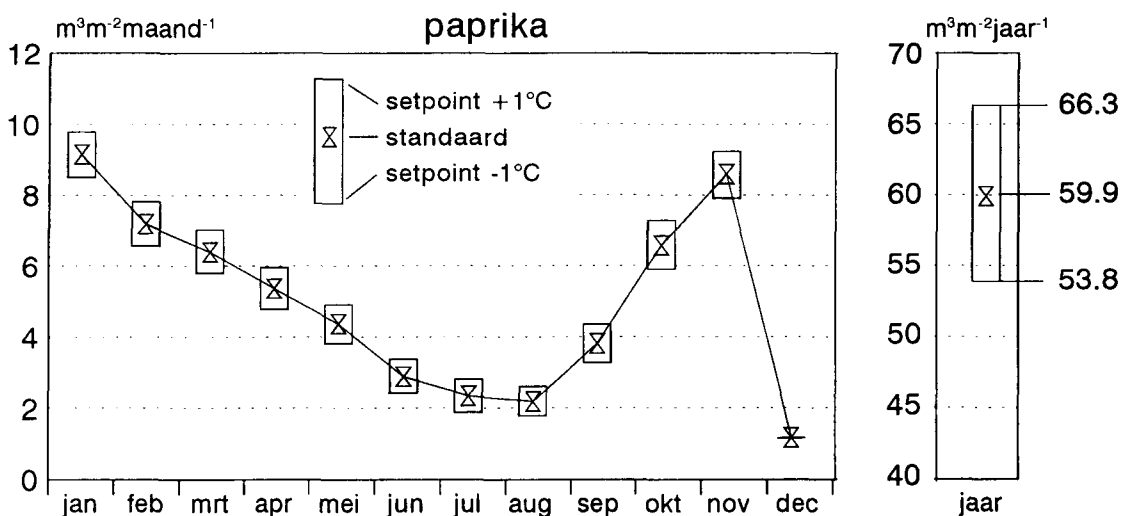


Figuur 4.16 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor een paprikateelt in de uitgangssituatie.
Figure 4.16 Monthly and yearly gas consumption for the reference situation of sweet pepper

4.4.2 Gasverbruik bij gewijzigde setpointinstellingen

4.4.2.1 Verandering van de stooktemperatuur

In figuur 4.17 is het gasverbruik weergegeven bij een 1 °C hoger en 1 °C lager ingestelde stooktemperatuur.



Figuur 4.17 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor paprikateelt in de uitgangssituatie (getrokken lijn) en bij een 1 °C verhoogde en een 1 °C verlaagde stooktemperatuur.
Figure 4.17 Monthly and yearly gas consumption for the growth of sweet pepper in the reference temperature regime (full curve) and in case the temperature setpoint is incremented or decremented 1 °C.

Op jaarbasis wordt door het model voor de paprikateelt bij een 1 °C hogere stooktemperatuur een verbruik van 66 m³m⁻² berekend (+6,3 m³, +11%). De verlaagde stooktemperatuur leidt tot een gasverbruik van 54 m³m⁻²jaar⁻¹ (-6,1 m³, -10%). De effecten van een veranderd temperatuursetpoint zijn bij de paprika vergelijkbaar met die bij de komkommer.

4.4.2.2 Toepassing van minimumbuis

In de uitgangssituatie is geen minimumbuisregeling opgenomen. In deze paragraaf wordt het effect van een 'lage' minimumbuis temperatuur (45 °C overdag en 40 °C 's nachts) en een 'hoge' variant (60 °C overdag en 50 °C 's nachts) ten opzichte van de uitgangssituatie getoond.

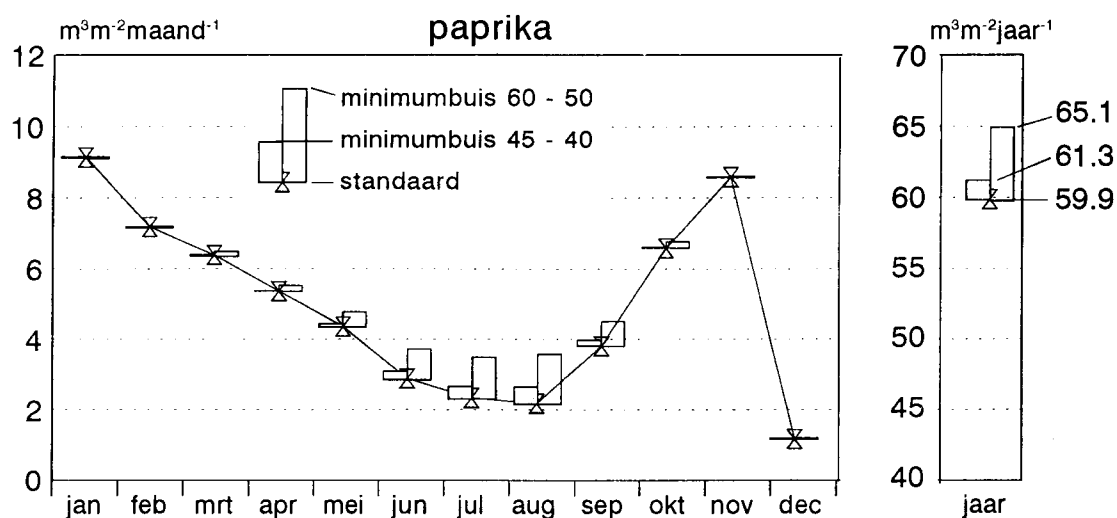
Overdag wordt in beide varianten de minimumbuis lichtafhankelijk afgebouwd (zie § 3.2.3). In tabel 4.14 zijn de bestudeerde effecten kort weergegeven.

Tabel 4.14 Aangebrachte varianten in minimumbuis temperatuur

Table 4.14 Evaluated alternatives with respect to minimum pipe temperature

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant 1	zie figuur 4.15	45 dag, 40 nacht	80%	zie tabel 4.13	bij warmtevraag	geen
variant 2	zie figuur 4.15	60 dag, 50 nacht	80%	zie tabel 4.13	bij warmtevraag	geen

De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.18. Het effect van de lage minimumbuis temperatuur bleef beperkt tot slechts 2 m³ (2%). De 'hoge' minimumbuis variant verhoogde het gasverbruik met 6,2 m³ tot 65 m³m⁻²jaar⁻¹ (+9%). Vanwege de hogere warmtebehoefte van de paprika is het effect kleiner dan bij de komkommer en veel kleiner dan bij de tomaat.



Figuur 4.18 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor de paprikateelt in de uitgangssituatie en bij toepassing van minimumbuis. Variant 1 en 2 zijn gedefiniëerd in tabel 4.14

Figure 4.18 Reference monthly gas consumption and yearly total for sweet pepper and for two minimum pipe applications. The definition of the situations is presented in table 4.14

4.4.2.3 Verandering van de vochtgrens

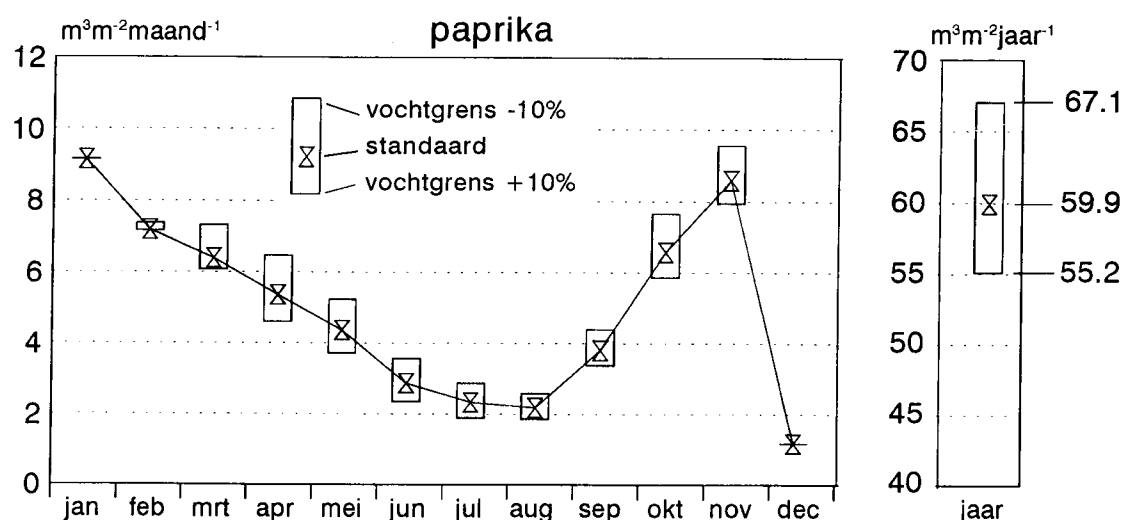
Om het gasverbruikseffect van een veranderde vochtgrens te bestuderen is de vochtgrens 10% verhoogd en verlaagd ten opzichte van de referentiesituatie. In tabel 4.15 zijn de twee varianten kort weergegeven.

Tabel 4.15 Aangebrachte varianten in de vochtregeling.

Table 4.15 Evaluated alternatives with respect to humidity control.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant 1	zie figuur 4.15	geen	70%	zie tabel 4.13	bij warmtevraag	geen
variant 2	zie figuur 4.15	geen	90%	zie tabel 4.13	bij warmtevraag	geen

De resultaten zijn afgebeeld in figuur 4.19. Een verhoging van de vochtgrens leidt tot een vermindering van het gasverbruik met $4,7 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (-8%). Een verlaging van de vochtgrens naar 70% leidt tot een extra verbruik van $7,4 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (+12%).



Figuur 4.19 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor paprika in de uitgangssituatie en bij verandering van de vochtgrens waarboven de klimaatregelaar de ramen opent.

Figure 4.19 Reference monthly and yearly gas consumption for sweet pepper and after changing the humidity setpoint

4.4.2.4 Effect energiescherm

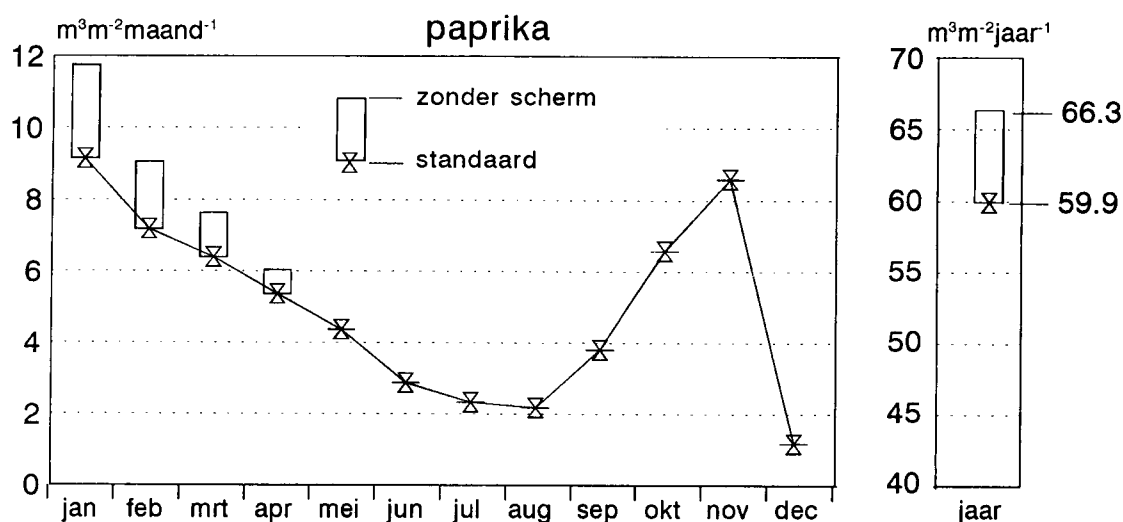
In de paprika-teelt wordt in de uitgangssituatie intensief van een energiescherm gebruik gemaakt. Daarom wordt in deze paragraaf de gasverbruikstoename getoond, als het energiescherm uit de bedrijfsuitrusting wordt verwijderd.

Tabel 4.17 Klimaatregelaarinstellingen voor de paprikateelt zonder scherm.

Table 4.17 Climate controller settings holding for the simulation on the energy consumption of sweet pepper without a thermal screen.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
variant	zie figuur 4.15	geen	80%	geen	bij warmtevraag	geen

In figuur 4.20 is het gasverbruik weergegeven voor de paprikateelt zonder scherm. Het blijkt dat hierdoor het enenergieverbruik toeneemt van $60 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ naar $66 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (+6,4 m³, +11%). In andere woorden kan worden gezegd dat de toepassing van een scherm in de paprikateelt een energiebesparing levert van 10%.



Figuur 4.20 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor paprika in de uitgangssituatie en na verwijdering van het beweegbaar scherm.

Figure 4.20 Reference monthly and yearly gas consumption for sweet pepper in the reference situation and after removing the thermal screen.

4.4.2.5 CO₂-dosering en warmte-opslag

Het laatste effect dat voor de paprikateelt wordt bestudeerd, is de invloed van CO₂-dosering en warmte-opslag. Hierbij vindt CO₂-dosering plaats vanaf zonsopgang tot een uur voor zonsondergang, ongeacht de warmtevrage. Warmte-overschotten worden in de buffer opgeslagen, totdat de buffer vol is. Daarna worden de warmte-overschotten afgelucht (en wordt er dus warmte vernietigd).

In de simulaties worden twee doseersnelheden toegepast (de verbranding van 60 en 100 m³ aardgas per ha per uur) en, naast een referentiesituatie zonder buffer, twee bufferafmetingen (50 en 100 m³ha⁻¹).

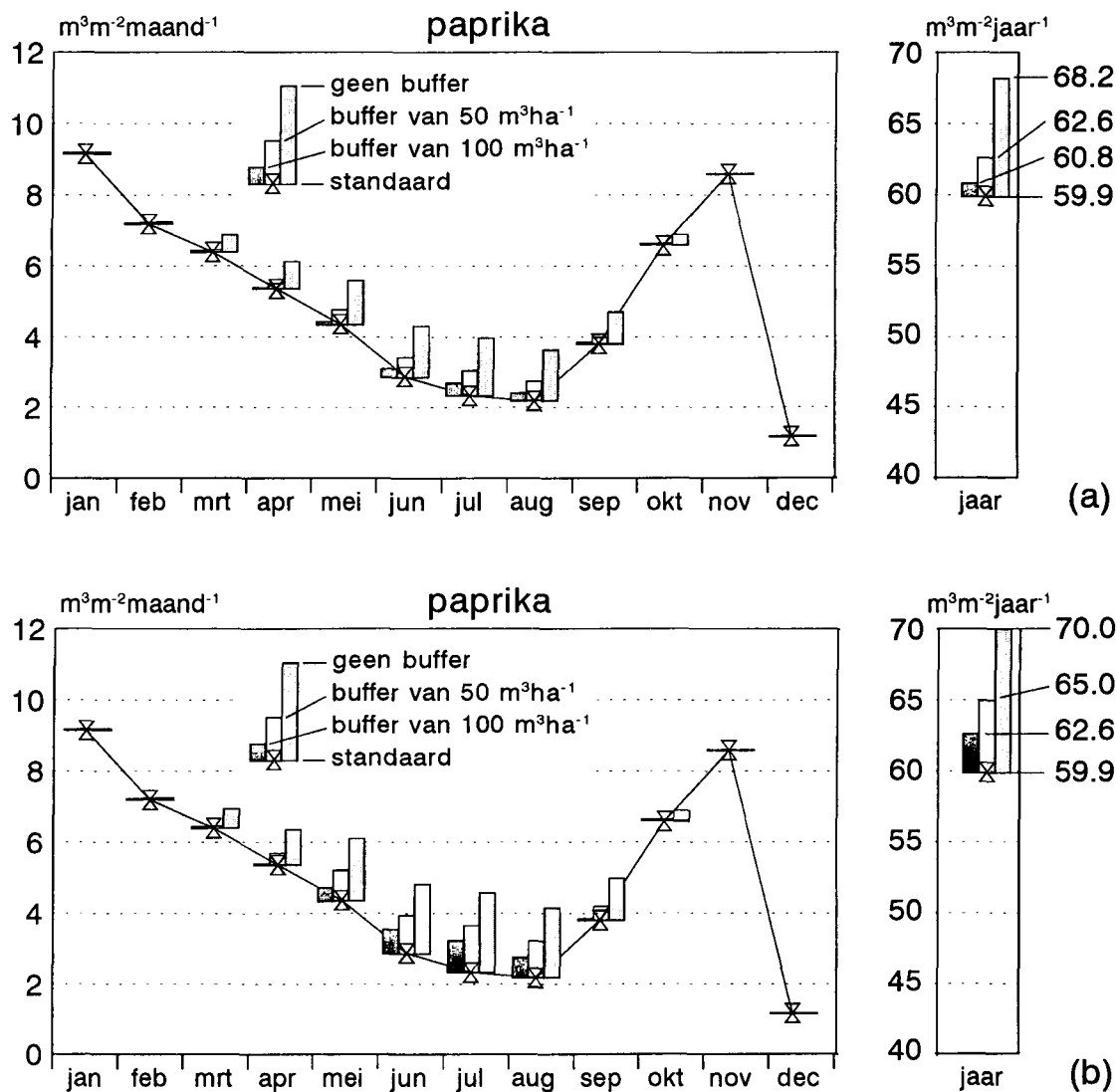
Tabel 4.18 Aangebrachte varianten met betrekking tot CO₂-dosering en warmte-opslag capaciteit.

Table 4.18 Evaluated alternatives with respect to CO₂-supply and heat storage capacity.

	temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	CO ₂ -dosering	buffer
set 1	zie figuur 4.15	geen	80%	zie tabel 4.13	60 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	0 m ³ ha ⁻¹ 50 m ³ ha ⁻¹ 100 m ³ ha ⁻¹
set 2	zie figuur 4.15	geen	80%	zie tabel 4.13	100 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	0 m ³ ha ⁻¹ 50 m ³ ha ⁻¹ 100 m ³ ha ⁻¹

De resultaten voor de lage doseersnelheid zijn weergegeven in figuur 4.21a. De resultaten voor de hoge doseersnelheid staan in figuur 4.21b. De toepassing van een buffer van 50 m³ha⁻¹ brengt het extra verbruik door CO₂-dosering met de 'lage' capaciteit van 8,3 m³m²jaar⁻¹ terug naar 2,7 m³m²jaar⁻¹. Het extra verbruik is daarmee afgenomen van 11% naar 4%. Een verdere vergroting van de buffer naar 100 m³ha⁻¹ maakt dat bijna alle warmte uit CO₂-dosering benut kan worden. Het extra verbruik daalt naar slechts 0,9 m³(1%).

Bij de 'hoge' doseersnelheid leidt de CO₂-dosering zonder warmte-opslag tot een meerverbruik van 10 m³m²jaar⁻¹ (18%). De buffer van 50 m³ha⁻¹ verlaagt dit extra verbruik naar 5,1 m³ (8%)



Figuur 4.21 Maandelijks en jaarlijks aardgasverbruik voor de paprikateelt in de uitgangssituatie en bij toepassing van CO₂-dosering ongeacht de warmtevraag voor drie buffer-afmetingen (0, 50 en 100 m³ha⁻¹). CO₂-dosering vindt plaats van zonsopkomst tot een uur voor zon-ondergang zolang de CO₂-concentratie onder de 600 ppm blijft. In (a) is de doseersnelheid 60 m³ha⁻¹uur⁻¹. In (b) is de doseersnelheid 100 m³ha⁻¹uur⁻¹.

Figure 4.21 Reference monthly and yearly gas consumption for sweet pepper and by application CO₂-supply irrespective the heat demand for three heat storage tank dimensions (0, 50 and 100 m³ha⁻¹). CO₂ is supplied from sunrise till one hour before sunset as long as the CO₂ concentration does not exceed 600 ppm. In (a) the supply rate is 60 m³ha⁻¹hr⁻¹. In (b) a supply rate of 100 m³ha⁻¹hr⁻¹ has been applied.

en een buffer van 100 m³ha⁻¹ doet het extra verbruik afnemen naar 2,7 m³ (4%).

Het blijkt dat in de paprikateelt de buffer veel beter in staat is het extra verbruik uit CO₂-dosering op te heffen dan in de andere teelten die in dit rapport zijn beschreven. Dit komt doordat het initiële meerverbruik (het meerverbruik door CO₂-dosering zonder buffer) in de paprikateelt kleiner is.

Het maximale buffereffect in de paprikateelt is 8,3 m³m⁻²jaar⁻¹ (een buffer van 100 m³ in vergelijking met geen buffer bij een CO₂-doseersnelheid van 100 m³ha⁻¹uur⁻¹) en ligt daarmee tussen het maximale effect in de tomatenteelt en het maximale effect in de komkommerteelt in.

4.4.3 Conclusies voor de paprikateelt

In tabel 4.19 is een overzicht gegeven van de absolute en relatieve gasverbruikseffecten die voor de paprika zijn berekend.

Tabel 4.19 Absolute en relatieve energieverbruikseffecten van veranderingen in de kasklimaatregelaar-setpoints en de bedrijfsuitrusting in vergelijking met een uitgangssituatie voor paprika.

Table 4.19 Absolute and relative energy consumption effects of alternative climate controller settings and greenhouse utilities compared to a reference situation for sweet pepper.

	varianten	jaarverbruik m ³ m ²	effect m ³ m ²	relatief
uitgangssituatie paprika	-	59,9	-	-
temperatuureffect	+1 °C	66,3	+6,4	+11%
	-1 °C	53,8	-6,1	-10%
minimumbuis	45 - 40	61,3	+1,4	+2%
	60 - 50	65,1	+5,2	+9%
vochtgrens	+10%	55,2	-4,7	-8%
	-10%	67,3	+7,4	+12%
plaatsing energiescherm		66,3	+6,4	+11%
CO ₂ -dosering 60 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	buffer 0 m ³ ha ⁻¹	68,2	+8,3	+14%
	50 m ³ ha ⁻¹	62,6	+2,7	+4%
	100 m ³ ha ⁻¹	60,8	+0,9	+1%
CO ₂ -dosering 100 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	buffer 0 m ³ ha ⁻¹	70,0	+11,0	+18%
	50 m ³ ha ⁻¹	65,0	+5,1	+8%
	100 m ³ ha ⁻¹	62,6	+2,7	+4%

4.5 Samenvatting energieverbruikseffecten

In deze paragraaf wordt ingegaan op de jaarlijkse gasverbruikseffecten van de drie teelten tengevolge van wijziging van setpoints of bedrijfsuitrusting. Daartoe worden de absolute gasverbruiken voor de drie uitgangssituaties en de relatieve gasverbruikseffecten van de bestudeerde effecten in één tabel gezet (tabel 4.18). De effecten die in de tabel staan opgenomen worden apart toegelicht.

Temperatuur

Het temperatuursetpoint blijkt grote invloed te hebben op het brandstofverbruik. Een jaarrond wijziging van het setpoint met 1 °C heeft bij alle teelten een effect van 10 tot 12% op het brandstofverbruik. Het extra verbruik bij 1 °C hoger is ongeveer gelijk met de besparing bij 1°C lager. De bevindingen met betrekking tot het temperatuursetpointeffect komen goed overeen met de resultaten die door Breuer werden gepresenteerd (Breuer, 1987).

Minimumbuis

De invloed van het aanhouden van een minimumbuis van 45 °C overdag (afgebouwd op lichtnivo) en 40 °C 's nachts geeft in de paprikateelt een gasverbruiksverhoging van 2% en bij tomaten een verhoging van 9%. Wordt een hogere minimumbuis temperatuur aangehouden (60

°C overdag, afgebouwd op lichtnivo, en 50 °C 's nachts) dan neemt het gasverbruik in de paprikateelt met 9% en in de tomatenteelt met 25% toe. Het veel grotere verbruikseffect in de tomatenteelt komt door het geringe warmteverbruik van de tomaat in de zomerperiode.

Tabel 4.18 Absolute en relatieve energieverbruikseffecten van veranderingen in de kasklimaatregelaar-setpoints en de bedrijfsuitrusting in vergelijking met een uitgangssituatie voor tomaat.

Table 4.18 Absolute and relative energy consumption effects of alternative climate controller settings and greenhouse utilities compared to a reference situation for tomatoes.

		tomaat	komkommer	paprika
uitgangssituatie m ³ m ² jaar ⁻¹	-	52,2	57,1	59,9
temperatuureffect	+1 °C	12%	9%	11%
	-1 °C	-11%	-10%	-10%
minimumbuiseffect	45 - 40	9%	3%	2%
	60 - 50	25%	13%	9%
vochtgrens	+10%	-4%	-7%	-8%
	-10%	8%	12%	12%
plaatsing energiescherm*		-16%	-7%	11%
CO ₂ -dosering 60 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	buffer 0 m ³ ha ⁻¹	21%	16%	14%
	50 m ³ ha ⁻¹	10%	6%	4%
	100 m ³ ha ⁻¹	7%	2%	1%
CO ₂ -dosering 100 m ³ ha ⁻¹ uur ⁻¹	buffer 0 m ³ ha ⁻¹	30%	22%	18%
	50 m ³ ha ⁻¹	18%	11%	8%
	100 m ³ ha ⁻¹	14%	7%	4%

*Het effect van een energiescherm is voor ieder gewas op een andere wijze bepaald omdat de standaardbedrijfssituatie ten aanzien van het schermgebruik per gewas nogal verschilt.

Vochtgrens

De instelling van de vochtgrens heeft bij komkommer en paprika een grote invloed op het brandstofverbruik. Bij tomaat is het effect een stuk kleiner. Voor alle gewassen blijkt dat een verhoging van de vochtgrens vanaf 80% een kleiner energiebesparend effect heeft dan het extra energieverbruik voor eenzelfde verlaging ten opzichten van 80%. Dit komt omdat door condensatie de RV al vaak dicht bij de 80% ligt, zodat bij een hoger vochtsetpoint het aantal uren dat de ramen geopend zijn om vocht af te voeren niet veel kleiner zal worden. Bij een verlaging van het setpoint richting 70% gaat het (energieverbruiks-beperkende) condensatiemechanisme steeds minder bijdragen zodat de ramen veel vaker geopend worden om vocht af te voeren.

Het feit dat het relatieve (en dus ook het absolute) energieverbruikseffect van de vochtregeling bij zwaar gestookte teelten groter is dan bij de tomaat komt doordat bij teelten met een hogere luchttemperatuur meer warmte verloren gaat bij het luchten op vocht dan bij koudere teelten.

Schermen

Wanneer bij tomaten een beweegbaar scherm wordt ingezet dat 's nachts gesloten is indien de buitentemperatuur lager is dan 5 °C kan een brandstofbesparing van 16% worden bereikt. Bij komkommers, waar in de uitgangssituatie in de eerste maand van de teelt een vast scherm

wordt gebruikt, is het effect nagegaan, indien het vaste scherm gedurende de eerste maand wordt vervangen door een beweegbaar scherm. Het beweegbaar scherm wordt daarbij zowel 's nachts als overdag gebruikt zolang de buitentemperatuur lager is dan 5 °C en de globale straling minder dan 30 W/m². Het gebruik van een beweegbaar scherm in plaats van een vast scherm levert in de eerste maand van de teelt een meerverbruik, maar in de overige koude maanden een besparing van energie. Op jaarbasis levert het gebruik van een beweegbaar scherm in de komkommerteelt een brandstofbesparing van 7%.

Bij paprika is in de standaardbedrijfssituatie een beweegbaar scherm geïnstalleerd, dat vanaf het planten tot 1 mei wordt ingezet. Het blijkt dat indien dit scherm niet wordt ingezet, het brandstofverbruik 11% hoger uitkomt.

CO₂-dosering en warmte-opslag

Indien er geen warmte-opslagtank wordt gebruikt en de CO₂-dosering onafhankelijk is gesteld van de warmtevraag loopt het gasverbruik door CO₂-dosering sterk op. Uiteraard is de toename van het gasverbruik groter naarmate meer CO₂ gedoseerd wordt en naarmate de warmtebehoefte in de referentiesituatie kleiner is. De 'lage' doseersnelheid levert in de tomatenteelt zonder warmtebuffer een meer-verbruik van 21%. In de komkommer en paprikateelt is de stijging van het gasverbruik respectievelijk 16% en 14%. Voor de hoge doseersnelheid zijn de meerverbruiken respectievelijk 30%, 22% en 18%.

Door toepassing van een buffer kan het extra verbruik sterk worden verminderd. In de tomatenteelt is de vermindering van het extra verbruik echter beperkt doordat de warmtebehoefte per etmaal in de periode waarin veel CO₂ wordt gedoseerd (de zomer) relatief klein is. De grote buffertank brengt het extra verbruik voor de lage doseersnelheid niet verder terug dan 7% en voor de hoge doseersnelheid niet verder dan 14%. In de paprikateelt wordt het extra verbruik bij de lage doseersnelheid door de grote buffer bijna helemaal weggenomen (1%). Ook bij de hoge doseersnelheid beperkt de warmtebuffer het extra verbruik in de paprikateelt tot slechts 4%.

In tegenstelling tot de relatieve effecten die bij de verschillende bufferafmetingen en doseersnelheden voor de drie gewassen behoorlijk verschillen zijn de absolute energie-besparingen door de buffer vrijwel overal gelijk. Voor alle situaties blijkt de maximale energiebesparing van een buffer rond de 8,5 m³m²jaar⁻¹. Deze wordt gerealiseerd met een buffer van 100 m³ bij een CO₂-doseersnelheid van 100 m³ha⁻¹uur⁻¹. Bij een lagere doseersnelheid is het effect van de buffer nauwelijks minder. De besparingen van een tank van 50 m³ha⁻¹ liggen voor alle situaties rond de 6 m³m²jaar⁻¹. Hieruit blijkt heel duidelijk dat de extra opslagcapaciteit bij de vergroting van de buffertank van 50 m³ naar 100 m³ per hectare veel minder oplevert dan de eerste 50 m³.

5 Het programma setpoint

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 werden voor drie teelten gasverbruikseffecten van een aantal wijzigingen in setpointinstellingen en bedrijfsuitrustings kenmerken bestudeerd. De getoonde effecten hebben echter betrekking op zeer nauw omschreven uitgangspunten en kunnen daarom moeilijk vertaald worden naar willekeurige situaties in de glastuinbouw. Vooral de effecten ten gevolge van gecombineerde wijzigingen, bijvoorbeeld een hogere vochtgrens, gecombineerd met een lagere stooktemperatuur, kunnen moeilijk ingeschat worden.

Daarom zijn naast de 42 simulaties die voor hoofdstuk 4 zijn uitgevoerd nog 171 andere situaties doorgerekend. Omdat het ondoenlijk is al de gegenereerde informatie op papier vast te leggen zijn de resultaten van deze berekeningen op een diskette opgeslagen. Tevens is op deze diskette een programma aanwezig dat de informatie voor de gebruiker ontsluit. Dit programma draagt de naam SETPOINT.

Het programma SETPOINT selecteert informatie uit de 171 bestanden met simulatieresultaten zodanig dat elke willekeurige uitgangssituatie met betrekking tot de variabelen die in hoofdstuk 4 werden toegepast kan worden opgesteld. Vervolgens kunnen vanuit deze uitgangssituatie willekeurige wijzigingen, of combinaties van wijzigingen worden aangebracht. Daarbij kunnen de wijzigingen in het gasverbruik worden geanalyseerd. Ook het effect van CO₂-dosering op de gewasgroei wordt door SETPOINT bepaald.

In dit hoofdstuk wordt globaal de werking van het programma SETPOINT uiteengezet (§ 5.2) en worden de toegepaste algoritmen gepresenteerd (§ 5.3). Bij het programma is een uitgebreide gebruikershandleiding beschikbaar.

5.2 De werking van het programma SETPOINT

Het programma SETPOINT ontsluit de informatie die met het simulatiemodel KASPRO is gegenereerd, en die als bestanden op schijf¹ liggen opgeslagen. Het programma selecteert hiertoe één of meerdere bestanden op grond van een door de gebruiker ingestelde set van kasklimaat setpoints, schermgebruik en het gewastype.

De selecties worden gemaakt op maand basis of op basis van 4-wekelijkse perioden (deze optie kan door de gebruiker worden ingesteld. Daar waar in het onderstaande over 'maand' wordt gesproken kan dus ook 'periode' worden gelezen). Door voor elke maand te kijken welke instellingen de gebruiker voor die maand heeft gemaakt, kan SETPOINT de juiste simulatieresultaten uit één van de 171 bestanden halen. Daarbij wordt elke set van maandinstellingen afzonderlijk geïnterpreteerd naar nacht- en naar daginstellingen. Als de instellingen voor de nacht overeenkomen met de nachtinstellingen van één van de 171 bestanden en de instellingen voor de dag met de daginstellingen van een ander bestand dan worden de gegevens die betrekking hebben op de nacht uit het ene, en de gegevens die betrekking hebben op de dag uit het andere bestand gehaald.

Het zal echter vaak voorkomen dat een willekeurige set van instellingen met geen van de 171 gekozen combinaties overeenkomt. Is dat het geval, dan gaat SETPOINT interpoleren (of extrapoleren). Het programma selecteert daartoe de bestanden die zijn berekend met instelling-combinaties die het dichtst bij de set van instellingen ligt die de gebruiker heeft gekozen. Dit kan leiden tot een meer-dimensionale interpolatie. Zo kan het dus zijn dat het programma

¹Met 'schijf' wordt hier een harde schijf, een diskette of netwerkschijf bedoeld.

een set met simulatieresultaten opstelt uit 16 bestanden (een drie-dimensionale interpolatie vereist 8 bestanden voor de dagperiode en 8 bestanden voor de nachtperiode zijn samen 16 bestanden). Wordt de optie 'droogstoken' meegenomen dan kunnen dit zelfs 20 bestanden worden omdat de energieverbruiksgegevens voor het eerste uur van de dag in dat geval soms uit andere bestanden gehaald moet worden dan de energieverbruiksgegevens voor de rest van de dag (zie § 5.3).

Nadat voor alle dagen van de maand de set met simulatie-resultaten is samengesteld, worden CO₂-dosering en buffer effect erop ingepast en wordt een maandverbruik in m³ gas berekend. Ook worden gewas-groei effecten ten gevolge van CO₂-dosering door middel van de CO₂-regel (Nederhoff, 1994) ingeschat. Deze berekeningen worden beschreven in § 5.3.

De instellingen die bij de berekening van de 171 bestanden als variabele hebben gegolden hebben betrekking op het temperatuursetpoint, de minimumbuis temperatuur, de vochtgrens, het schermgebruik en de gewasomvang (vastgelegd in de LAI²). Voor al deze variabelen, zijn drie situaties ingesteld. Deze zijn aangegeven in tabel 5.1.

Tabel 5.1 Setpoints, schermgebruik en LAI-waarden waarvoor de simulaties zijn uitgevoerd.
Table 5.1 Climate controller setpoints, screen application and LAI-values applied in the simulations.

temperatuur	minimumbuis	vochtgrens	scherm	LAI
dag 17 °C, nacht 15 °C	dag 30 °C, nacht 20°C	65% RV	geen	1
dag 20 °C, nacht 18 °C	dag 45 °C, nacht 35°C	75% RV	vast	2
dag 23 °C, nacht 21 °C	dag 60 °C, nacht 50°C	85% RV	beweegbaar	3

Als alle combinaties van drie nivo's voor 5 variabelen worden doorgerekend zijn hiervoor $3_{\text{temperatuur}} \times 3_{\text{minimumbuis}} \times 3_{\text{vochtgrens}} \times 3_{\text{scherm}} \times 3_{\text{LAI}} = 243$ simulaties nodig. Het doorrekenen van een aantal combinaties met het vaste (folie) scherm zijn echter niet zinvol, omdat er dan bij het gebruik van minimumbuis en een vochtgrens geen reële vochtbeheersingsinstrumenten zijn. Daardoor kan het aantal door te rekenen situaties worden teruggebracht tot $3_{\text{temperatuur}} \times 3_{\text{minimumbuis}} \times 3_{\text{vochtgrens}} \times 2_{\text{scherm}} \times 3_{\text{LAI}} + 3_{\text{temperatuur}} \times 3_{\text{LAI}} = 171$. De informatie die met deze 171 simulaties is gegenereerd is op schijf terug te vinden als 000.dat t/m 170.dat. Alleen de simulaties waarbij geen scherm wordt toegepast en de LAI=3 zijn jaarrond doorgerekend. Alle andere combinaties zijn voor een kortere periode doorgerekend (oktober t/m april) omdat die combinaties zich in de zomer niet voordoen (er wordt bijvoorbeeld geen energiescherm gebruikt in de zomer en er wordt voor die periode uitgegaan van een volgroeid gewas).

De resultaten van de simulaties zijn als 17 gegevens per dag opgeslagen in de genoemde bestanden. Daarbij zijn de warmteverbruiken uitgesplitst naar het warmteverbruik overdag en het warmteverbruik gedurende de nacht. Het dagverbruik hoort dus bij de setpointinstellingen die voor de dagperiode gelden en het nachtverbruik hoort bij de nachtinstellingen. Het feit dat het verbruik tijdens de opstookperiode in de ochtend en de afkoelperiode in de avond afhangen van zowel dag- als nachtsetpoints wordt verwaarloosd.

Naast de energieverbruiken zijn voor de dagperiode 10 ventilatiedebieten in de bestanden opgenomen. Het eerste ventilatiedebiet is het gemiddelde voor de ventilatie over het eerste uur. De overige 9 debieten zijn gemiddelden over 1/9 deel van de rest van de dag. In de zomer gelden deze 9 ventilatiesnelheden dus als gemiddelden over ongeveer 115 minuten, terwijl ze in de winter voor ongeveer drie kwartier gelden.

²De LAI (Leaf Area Index) geeft het blad oppervlak van het gewas per eenheid grond-oppervlak. In gewas-modellen speelt de LAI een centrale rol.

In de derde plaats is de gemiddelde retourwatertemperatuur over het laatste uur vóór zonsopkomst en de gemiddelde retourwatertemperatuur over het eerste uur daarna in de bestanden opgenomen. Deze gegevens worden gebruikt om de mate van afkoeling van de buffer te kunnen berekenen.

5.3 Rekenalgoritmen

5.3.1 Warmte-opslag en CO₂-dosering

De gasverbruikseffecten van CO₂-dosering en warmte-opslag worden door het programma SETPOINT berekend en zijn dus niet in de 171 bestanden opgenomen. Dit betekent dat deze effecten een kleinere nauwkeurigheid hebben dan gasverbruikseffecten die voortkomen uit kasklimaatinstellingen. Echter een snelle respons van het programma stond bij de ontwikkeling voorop en er was gesteld dat alle bestanden samen niet meer dan 1 Mbyte opslagcapaciteit zouden vergen. Er is dus bewust gekozen voor een wat grovere benadering.

De berekening van het gasverbruikseffect van CO₂-dosering komt neer op:

- 1) het berekenen van het warmte-aanbod uit CO₂-dosering.
- 2) de vergelijking van het warmte-aanbod met de warmtevraag.
- 3) het vullen of legen van de buffer bij een overschot respectievelijk tekort.
- 4) het afluchten van warmte als de buffer vol is of het toevoegen van warmte als de vraag het aanbod overtreft en de buffer leeg is.
- 5) het vergroten van het ventilatiedebiet als er moet worden afgelucht.

In onderstaande worden de formules die bij deze berekeningen worden gebruikt afgeleid en toegelicht.

5.3.1.1 Berekening van het warmte-aanbod

Warmte-opslag staat ten dienste van CO₂-dosering met ketelrookgassen. De te doseren hoeveelheid hangt af van de CO₂-concentratie in de kas in vergelijking tot de gewenste concentratie.

Uitgangspunt bij de berekening van de hoeveelheid warmte die door CO₂-dosering wordt opgewekt is dat de CO₂ uit de rookgassen het verlies van CO₂ door de ramen moet compenseren. Dit verlies wordt bekend met:

$$\text{verlies} = (\text{ppm_kas} - \text{ppm_buiten}) \times \text{vent} \times 1.825 \times 10^{-3} + \text{opname} \quad [\text{gm}^2 \text{uur}^{-1}] \quad (5.1)$$

Hierin geeft **vent** de ventilatie snelheid door de ramen weer in m³m²uur⁻¹ (m² staat voor een m² kas en niet voor een m² raam). De constante 1.825·10⁻³ rekent een concentratieverschil uitgedrukt in ppm om naar een concentratieverschil uitgedrukt in gm⁻³ en heeft dus de dimensie gm⁻³ppm⁻¹. Deze constante is berekend door middel van de universele gaswet ($\mu = M P V / (R T)$). **opname** is de CO₂-opname van het gewas, uitgedrukt in gm²uur⁻¹. Deze gewasopname is verondersteld alleen af te hangen van de hoeveelheid zonlicht en van de LAI. Deze gegevens zijn op schijf opgeslagen.

Omdat wordt uitgegaan van een statische berekening mag ook worden gesteld dat:

$$\text{verlies} = \text{dosering} \quad [\text{gm}^2 \text{uur}^{-1}] \quad (5.2)$$

Hierin staat **dosering** voor de doseersnelheid in gm²uur⁻¹, berekend uit de door de gebruiker aangegeven doseersnelheid in m³/ha/uur vermenigvuldigd met 1800 (gr CO₂/m³) en gedeeld door 1·10⁴ ten behoeve van de omrekening van hectare naar m².

Voor alle 10 de ventilatiedebieten die het simulatiemodel heeft berekend (zie § 5.2) wordt de kas-concentratie bepaald door substitutie van vgl. 5.2 in vgl. 5.1 van ppm_kas uit het stelsel vergelijking (5.1) en (5.2).

$$\text{ppm_kas} = \frac{\text{dosing-opname}}{1.825\text{e-}3 \text{ vent}} + \text{ppm_buiten} \quad [\text{ppm}] \quad (5.3)$$

Voor de buitenluchtconcentratie (ppm_buiten) wordt 350 ppm aangehouden. Berekent vgl 5.3 een kasluchtconcentratie boven het setpoint dan wordt het setpoint aangehouden en wordt de doseersnelheid verlaagd. De verlaging van de doseersnelheid wordt aangegeven met de variabele fr_dosing , die de fractie van de tijd aangeeft dat de CO_2 -dosing in werking is. fr_dosing is 1 zolang de met vgl 5.3 berekende CO_2 -concentratie beneden de streefwaarde ligt en wordt <1 als de dosering het verlies overtreft. In dat geval wordt fr_dosing berekend uit:

$$\text{fr_dosing} = \frac{(\text{setp_CO2-ppm_buiten}) \times \text{vent} \times 1.825\text{e-}3 + \text{opname}}{\text{dosing}} \quad [-] \quad (5.4)$$

Ten behoeve van de berekening van de uiteindelijke gemiddelde maandconcentratie worden alle berekende CO_2 -concentraties over de dagperiode gemiddeld.

Naast het berekenen van de resulterende CO_2 -concentratie wordt met fr_dosing ook de warmte-productie berekend volgens:

$$\text{E_co2} = \text{doseersnelheid} \times \text{fr_dosing} \times 35.17 \times \text{eta_ketel} / 3600 \quad [\text{Whm}^2\text{uur}^{-1}] \quad (5.5)$$

Hierin staat doseersnelheid voor de door de gebruiker aangegeven doseersnelheid in $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{uur}^{-1}$, 35.17 voor de verbrandingswaarde van gas op bovenwaarde per m^3 , gedeeld door $1 \cdot 10^4$ om ha om te rekenen naar m^2 en gedeeld door $1 \cdot 10^2$ om eta_ketel in procenten uit te kunnen drukken in plaats van als fractie. eta_ketel is het ketelredement op bovenwaarde in procenten. De deling door 3600 zorgt voor de omrekening van J naar Wh.

5.3.1.2 Berekening van het warmte-overschot

De vergelijking van warmte-vraag en warmte-aanbod wordt uitgevoerd voor de 10 tijdvakken waarin de dag is ingedeeld. Het eerste tijdvak van de dagperiode beslaat het eerste uur vanaf zonsopkomst. Het energieverbruik over dat uur staat in de set met daggegevens en wordt aangeduid met de variabele E1 .

Het warmte-overschot uit CO_2 -dosing voor het eerste uur kan dus worden berekend uit:

$$\text{over} = \text{E_co2} - \text{E1} \quad [\text{Whm}^2] \quad (5.6)$$

waarin E_co2 is berekend door toepassing van de formules 5.3 t/m 5.5, waarbij de variabele vent het ventilatiedebiet voor het eerste uur van de dag is (één van de 17 gegevens per dag in de databestanden)

5.3.1.3 Berekening van de bufferwerking

Is het warmte-overschot dat wordt berekend in vgl. 5.6 positief dan wordt deze warmte de buffer ingebracht, is het warmte-overschot negatief dan wordt de buffer ontladen. Voor beide buffer-acties wordt echter nagegaan of de buffer in staat is de warmte respectievelijk op te nemen of af te geven. De hoeveelheid die de buffer kan opnemen wordt bepaald door:

$$\text{Ein_max} = \text{cap} \times (\text{T_max} - \text{T_buffer}) \quad [\text{Whm}^2] \quad (5.7)$$

Hierin is cap de capaciteit van de buffer in $Whm^{-2}^{\circ}C^{-1}$, T_{max} de maximale, en T_{buffer} de actuele buffer temperatuur. De capaciteit wordt berekend uit het buffer volume in m^3/m^2 , berekend uit het door de gebruiker opgegeven buffervolume en bedrijfsoppervlak, vermenigvuldigd met $1.16 \cdot 10^3$, de soortelijke warmte van water in $Wh m^{-3} ^{\circ}C^{-1}$.

Overschrijdt $over$ E_{in_max} dan moet warmte worden afgelucht, of moet fr_doser worden verkleind. De keus die hierin wordt gemaakt berust op de instelling door de gebruiker (als buffer vol: afluchten of stoppen). Bij een positief warmte-overschot wordt de warmte-in-stroom naar de buffer gegeven door:

$$E_{in} = \min \{E_{in_max}, over\} \quad [Whm^{-2}] \quad (5.8)$$

Als de gebruiker heeft ingesteld dat een eventueel warmteoverschot moet worden afgelucht, dan wordt de af te luchten hoeveelheid warmte berekend uit $over - E_{in}$.

De hoeveelheid warmte die de buffer kan afgeven wordt bepaald door:

$$E_{uit_max} = cap \times (T_{buffer} - T_{retour}) \quad [Whm^{-2}] \quad (5.9)$$

Hierin is T_{retour} de temperatuur van het retourwater uit het verwarmingssysteem.

Is het warmte-overschot negatief, dan wordt de aanvulling van de warmtevraag vanuit de buffer berekend met:

$$E_{uit} = \min \{E_{uit_max}, E_1 - E_{co2}\} \quad [Whm^{-2}] \quad (5.10)$$

Het warmteverbruik door de ketel over het eerste uur kan vervolgens worden berekend uit

$$E_{ketel} = E_{co2} + (E_1 - E_{co2} - E_{uit}) \quad [Whm^{-2}] \quad (5.11)$$

Het vullen of legen van de buffer resulteert in een nieuwe gemiddelde buffertemperatuur volgens

$$T_{buffer} = T_{buffer} + (0.95 \times E_{in} - E_{uit}) / cap \quad [^{\circ}C] \quad (5.12)$$

E_{in} wordt met 0.95 vermenigvuldigd om een bufferverlies van 5% mee te nemen. Merk op dat in vergelijking 5.12 altijd E_{in} óf E_{uit} 0 is.

De berekening van CO_2 -warmte overschotten en de bufferwerking lopen voor de overige negen tijdvakken van de dag volgens dezelfde methode. Het enige verschil is dat de duur van de negen tijdvakken in het algemeen niet een uur is maar $1/9^e$ van de daglengte-1 (de term -1 is toegevoegd omdat het eerste dagdeel altijd één uur is). Deze tijdspanne wordt aangeduidt met t en varieert, zoals eerder gezegd tussen 115 en 45 minuten.

Door deze variatie in de tijdspanne verandert vergelijking 5.6 in

$$over = t \times E_{co2} - E_{dag} / 9 \quad [Whm^{-2}] \quad (5.13)$$

waarin E_{dag} de warmtevraag over de dag is exclusief het eerste uur. Vergelijking 5.10 verandert in:

$$E_{uit} = \min \{ E_{uit_max}, E_{dag} / 9 - t \times E_{co2} \} \quad [Whm^{-2}] \quad (5.14)$$

De berekening van het warmteverbruik (vergelijking 5.11) verandert in:

$$E_{ketel} = t \times E_{co2} + (E_{dag} / 9 - t \times E_{co2} - E_{uit}) \quad [Whm^{-2}] \quad (5.15)$$

In de instellingen wordt ervan uitgegaan dat de CO_2 -dosering één uur voor zon-onder wordt gestopt. t Wordt hiertoe het laatste uur van de dag met 1 verlaagd, maar nooit kleiner dan 0 gemaakt.

De buffer die overdag gevuld is, wordt 's avonds weer leeg gehaald. De hoeveelheid warmte die 's avonds aan de buffer wordt onttrokken, wordt bepaald met

$$E_{uit} = \min \{ E_{uit_max}, E_{avond} \} \quad [Whm^{-2}] \quad (5.16)$$

Hierin wordt E_{uit_max} berekend met vergelijking 5.9 waarbij de laatst beschikbare retour-temperatuur (dus de retourtemperatuur voor het eerste uur na zonsopkomst) wordt gebruikt. Eventuele additionele verwarming (omdat de buffer leeg kan zijn) wordt berekend met

$$E_{ketel} = E_{avond} - E_{uit} \quad [Whm^{-2}] \quad (5.17)$$

De hoeveelheid warmte die van middernacht tot zonsop uit de buffer wordt onttrokken wordt volgens dezelfde methode bepaald als de buffer-werking en additionele verwarming voor de avond-periode. E_{uit_max} wordt hierbij echter berekend aan de hand van de retour-temperatuur die geldt gedurende het eerste uur voor zonsopgang. Dus:

$$E_{uit} = \min \{ E_{uit_max}, E_{ochtend} \} \quad [Whm^{-2}] \quad (5.18)$$

en

$$E_{ketel} = E_{ochtend} - E_{uit} \quad [Whm^{-2}] \quad (5.19)$$

Het totale warmte-verbruik over een etmaal is de som van de warmte-verbruiken die zijn berekend in de vergelijkingen 5.11, 5.15, 5.17 en 5.19, waarbij vergelijking 5.15 9 maal wordt toegepast.

Het gasverbruik per dag wordt vervolgens uitgerekend met de formule:

$$\text{gasverbruik} = \frac{3.6e3 \times (\text{som} \{E_{ketel}\})}{35.17e4 \times \eta_{ketel}} \quad [m^3 m^{-2}] \quad (5.20)$$

waarin *som* staat voor de som van de toegevoegde ketel-warmte over de dag (de resultaten van 5.11, 9 keer de berekening van 5.15, het resultaat van 5.17 en van 5.19). Het gasverbruik per maand is de som van de dagelijkse gasverbruiken.

5.3.1.4 Berekening van het effect van afluchten

Als bij het vullen van de buffer de buffer vol is wordt de CO₂-dosering gestopt of wordt het warmte-overschot afgelucht (afhankelijk van wat de gebruiker heeft ingesteld). Beide acties hebben effect op het energieverbruik en de gerealiseerde CO₂-concentratie en worden dus meegenomen. Indien er gekozen is de warmte af te luchten, dan wordt het ventilatiedebiet hierdoor vergroot. Uit modelberekeningen blijkt dat het afluchten van warmte een extra ventilatiedebiet geeft van grofweg 0,4% per Watt af te luchten warmte. Dit betekent dat bij afluchten de variabele *vent* in vergelijking 5.3 wordt vermenigvuldigd met 0,4% van het warmte-overschot. Hieruit volgt dan een nieuwe CO₂-concentratie, waarmee vervolgens het groei-effect wordt ingeschat volgens de methode die in §5.3.2 wordt besproken.

5.3.2 Gewasgroei-effecten

Gewasgroei-effecten worden ingeschat door toepassing van de 'CO₂-regel' van E.M. Nederhoff. De CO₂-regel luidt dat de stijging van de gewasproductie in **procent-punten per 100 ppm** stijging van de CO₂-concentratie kan worden uitgedrukt met:

$$d\% = 1.5 \times (1000 / CO_{2_ref})^2 \quad [\%] \quad (5.21)$$

Hierin is CO_{2_ref} de CO₂ concentratie van waaruit de toename van de produktie wordt beschouwd. Let wel, indien de CO₂-concentratieverhoging meer dan 100 ppm is moet de formule cumulatief met stapjes van 100 ppm worden toegepast, afgesloten met een interpolatie over het laatste verhogings-traject. Het programma SETPOINT berekent de procentuele gewasgroei effecten ten opzichte van de gewasgroei bij 350 ppm. Indien er geen CO₂ wordt gedoseerd zal

het berekende gewasgroei effect dus een getal kleiner dan 100% aangeven omdat de CO₂-concentratie in de kas dan vaak onder de buitenconcentratie zal liggen.

Het programma SETPOINT gebruikt deze formule voor elk van de gerealiseerde CO₂-concentraties die voor de 10 dagdelen worden berekend (zie vergelijking 5.3). De gewasgroei effecten worden daarbij gewogen naar hun aandeel in de tijd (de eerste van de 10 dagdelen is het gemiddelde over een uur, de overige 9 dagdelen beslaan een tijdsperiode die gedefinieerd is door t). Daarnaast worden de gewasgroei-effecten per dag ten opzichte van elkaar gewogen op grond van het aandeel van die dag in de totale assimilatie voor die maand. Er wordt geen jaar-effect berekend omdat er geen informatie beschikbaar is hoeveel gewicht aan de verandering van groei-snelheden per maand moet worden toegekend.

5.3.3 Teelteffect

In energieverbruiksmodellen heeft het gewas dat in de kas geteeld wordt effect op het gasverbruik via de verdamping van het gewas. Gewas-karakteristieken, en vooral de gewas-omvang spelen daarbij een cruciale rol. Bij de berekeningen die zijn gemaakt om de energieverbruiksbestanden te genereren is echter alleen het effect van de gewasomvang meegenomen. De gebruiker kan een keus maken uit een meerjarige teelt en een één-jarige teelt. Als er een één-jarige teelt wordt geselecteerd dan wordt de LAI van het gewas in de plantmaand op 1 gesteld, de volgende maand op 2 en de rest van het jaar op 3. De plantmaand moet dan eveneens op het werkscherm worden ingesteld, maar moet in de laatste of de eerste drie maanden van het kalenderjaar vallen.

Wordt een meerjarige teelt geselecteerd dan heeft het getal dat bij de plant-maand staat geen effect en wordt de LAI in november, december, januari en februari op 2 gezet en de rest van het jaar op 3.

6 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Het IMAG-DLO kasklimaat-simulatieprogramma KASPRO biedt de mogelijkheid om de invloed van setpoint-wijzigingen op het energieverbruik zichtbaar te maken. Met het model kan het energie-effect dat voortkomt uit wijzigingen van één bepaalde setpointinstelling of verandering van de bedrijfsuitrusting geïsoleerd worden weergegeven. Met dit dynamische model zijn korte en lange termijn effecten tengevolge van willekeurige dagelijkse veranderingen met betrekking tot setpointinstellingen en de inzet van de bedrijfsuitrusting op het brandstofverbruik berekend.

De absolute energieverbruikseffecten van de bestudeerde opties variëren van $-8,6 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (besparing door een energiescherm bij tomaten) tot $+15,4 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$ (CO_2 -dosering ongeacht de warmtevraag door de verbranding van 100 m^3 aardas per hectare per uur op een bedrijf zonder warmtebuffer). Wanneer er geen warmtebuffer is blijkt van alle bestudeerde invloedsfactoren voor elk van de drie teelten het energieverbruikseffect van CO_2 -dosering het grootst. Wanneer een buffer wordt gebruikt komt het extra energieverbruik door CO_2 -dosering lager te liggen dan dat van de toepassing van een hoge minimumbuistemperatuur (60°C overdag, 50°C 's nachts). Voor alle teelten is het effect van de toepassing van een lage minimumbuistemperatuur (45°C overdag, 40°C 's nachts) minder dan het effect van de verhoging van de stooktemperatuur met 1°C of de verlaging van de vochtgrens met 10% RV.

Uit de berekeningen blijkt dat een verandering van de stooktemperatuur met 1°C een verandering van het energieverbruik met ongeveer 10% oplevert.

Voor alle gewassen is de energiebesparing die werd behaald door het verhogen van de vochtgrens van 80% RV naar 90% RV kleiner dan het effect van een verlaging van de stooktemperatuur met 1°C .

Het gebruik van een beweegbaar energiescherm levert in de tomaten-teelt een besparing van 16% procent ten opzichte van de Ausgangssituatie. In de paprikateelt is het energieverbruikseffect van het energiescherm 11%. Voor de komkommerteelt, waar in de Ausgangssituatie de eerste maand van de teelt een vast scherm wordt gebruikt, leidt de vervanging van het vaste scherm door een beweegbaar scherm dat de hele koude periode van het jaar kan worden gebruikt tot een besparing van 7%.

Door middel van een warmte-opslagtank kan veel energie worden bespaard. In de berekeningen die in dit rapport zijn gepresenteerd blijkt de maximale energiebesparing van een buffer rond de $8,5 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$. Dit wordt gerealiseerd met een buffer van 100 m^3 bij een CO_2 -doseersnelheid van $100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{uur}^{-1}$. Ook bij een lagere doseersnelheid (de verbranding van 60 m^3 aardgas per ha pre uur) is het effect van de buffer ongeveer $8 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$. De besparingen van een tank van $50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ligt rond de $6 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{jaar}^{-1}$. Hieruit blijkt duidelijk dat bij vergroting van de buffer een sterke afname van meer-opbrengsten met betrekking tot energiebesparing optreedt.

Met het in het kader van dit onderzoek ontwikkelde programma SETPOINT kunnen energieverbruiken worden berekend bij gewijzigde Ausgangssituaties en effecten bij gecombineerde wijzigingen van setpointinstellingen. De gegenereerde informatie is op een diskette gezet, waardoor het mogelijk is inzicht te verkrijgen in gedetailleerde energieverbruikseffecten vanuit willekeurige situaties (m.b.t. de setpointinstelling en de bedrijfsuitrusting) in de glastuinbouw. Omdat het programma SETPOINT is opgezet voor interactief gebruik is weergave van berekeningsresultaten ondoenlijk. De werking van het programma en de gekozen rekenalgoritmen

zijn echter uitvoerig beschreven.

Het programma is gebruikersvriendelijk samengesteld en kan daardoor door een brede groep worden gebruikt voor het bepalen van energieverbruikseffecten in praktijksituaties. Op deze manier is een belangrijk hulpmiddel toegevoegd voor de instelling van energiezuinige en bedrijfseconomisch verantwoorde setpointwaarden en de inzet van bedrijfsuitrusting.

Aanbevelingen

De bevindingen met het gebruik van het programma SETPOINT in contacten met tuinders en voorlichters zijn zeer positief. Het aantal variabelen dat in de bedrijfsuitrusting kan worden aangebracht is echter beperkt tot energieschermen en warmtebuffers. Uitbreiding van het programma teneinde ook assimilatiebelichting, verduisteringsschermen en warmte/krachtkoppeling in de bedrijfsuitrusting op te kunnen nemen is dan ook aanbevelenswaardig. Toevoeging van belichting en andere schermtypen opent de mogelijkheid ook energieverbruikseffecten voor snijbloemen en potplanten te bepalen.

Summary

Recently, a number of reports and articles were published that discuss the effects of greenhouse climate controller setpoints and utilities in the greenhouse on energy consumption. Items discussed were the air temperature, minimum pipe and humidity setpoint, the application of thermal screens and short term heat storage in combination with CO₂-supply with exhaust gases from the boiler. More and more, the results presented in literature are based on simulation models, rather than empirical measurements, because of problems with respect to representativity and reproducibility of the latter. Therefore the results presented in this work are based on simulation as well.

Literature shows mostly year round effects of alterations in controller setpoints or utilities. However, especially with respect to the climate controller setpoints the impact of alterations on energy consumption should be known with more detail because in customary horticulture these settings are changed frequently. Therefore, in this work, the resolution of the description of effects is enhanced to a monthly time-scale.

To study the effects, a reference situation has to be defined. Therefore the greenhouse climate simulation model is configured to represent a modern Venlo-type glasshouse with a customary greenhouse climate controller. The simulated greenhouse was exposed to 'mean Dutch weather', as described by the SEL-year. In this work the data of the SEL-year are compared to the Dutch weather of the past five years.

With respect to the canopies the three major Dutch glasshouse-vegetables (tomato, cucumber and sweet pepper) served as a reference. After the definition of the reference climate requirements of these canopies, for every canopy the effects of changes on the greenhouse air temperature setpoint, the minimum pipe temperature, the humidity setpoint, the application of a thermal screen and the application of short term heat storage in combination with CO₂-supply was analyzed. The results on a monthly base were presented in graphs. Yearly totals were summarized in tables and discussed thoroughly.

It appears that the effects of the studied options on energy consumption varies from $-8.6 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$ (the saving by a thermal screen for tomatoes) to $+15.4 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$ (CO₂ supply from exhaust gases with a combustion rate of $100 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{hr}^{-1}$, irrespective the heat demand and without the availability of a short term heat storage tank). From all studied effects the impact of CO₂-supply on energy consumption is the most pronounced, unless a short term heat storage tank is applied. In that case the additional energy consumption by the application of a high minimum pipe temperature predominates.

Changes with respect to greenhouse air temperature setpoint appear to change the energy consumption with 10% per °C. The increment of the humidity setpoint from 80% to 90% yields an energy saving of about 6%, whereas the decrement of the humidity setpoint to 70% increases the energy consumption by about 9%.

The application of a thermal screen in tomatoes decreases the energy consumption by 16%. For sweet pepper a thermal screen decreases the energy consumption by 11%. For the growth of cucumber, where customary a non-movable foil is used during the first month after planting, the application a movable screen during the whole cold period of the year reduces the yearly energy consumption by 7%.

A short term heat storage tank of $50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ yields an energy saving of about $6 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$ with respect to a situation without a storage tank when the CO₂-supply exceeds $60 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{hr}^{-1}$. A tank with double the content saves about $8 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$.

In order to be able to study the effects of the variables discussed in this work on another domain and with respect to other reference situations a computer program has been developed. This program offers an interactive worksheet that facilitates the user to create a particular reference situation and study any of the effects subject to this work with respect to this reference. Also the effect of a combination of alterations can be studied. In this work the structure of the program and the algorithms applied are briefly, but completely discussed. The program and the userguide must be considered a part of this work. The program is stored on diskette.

Literatuur

- Breuer, J.J.G., 1987. *Jaarbelastingduurkromme en energiebesparing voor de Nederlandse glastuinbouw; een studie naar relevante invloeden*, IMAG, rapport 90
- Breuer, J.J.G., A.M. van Weele en A.H.C.van Paassen, 1991. *Referentiejaar voor de Nederlandse Glastuinbouw*, Klimaatbeheersing 20(1991)4.
- Bakker, J., 1994, *Energie: vraagtekens bij doel minimumbuis*, Groenten+Fruit/Glasgroenten 4(1994)2
- Houter, G. 1991, *ECP-model: Simulatiemodel voor energieverbruik, CO₂-verbruik en kg-productie in de glastuinbouw (Eindverslag)*. Proefstation voor Tuinbouw op de Glas, Naaldwijk
- Koning, A.M.N. de, 1994, *Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach*, PTG, Proefschrift
- Meerjarenafspraak tussen de Nederlandse glastuinbouwsector en de Staat vertegenwoordigd door de Ministers van Economische Zaken en Landbouw, Natuurbeheer en Visserij over de verbetering van de energie-efficiëntie*, 1992, Landbouwschap, Den Haag
- Nederhoff, E., 1990, *CO₂-dosering en luchten: plant hongert 's zomers naar extra kooldioxide*, De tuinderij, 70(1990)
- Nederhoff, E. en B. van der Kaay, 1994, *Snel schatting maken van produktie-effect dankzij CO₂-vuistregel*, Vakblad voor de bloemisterij, 49(1994)47
- Nederhoff, E.M., 1994, *Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse vegetable crops*, PTG, Proefschrift
- Rijsdijk, A., 1993, *Minimumbuis ter discussie*, Groenten+Fruit/Glasgroenten, (1993)45, 24-25
- Velden, N.J.A. Van der en B.J. van der Sluis, 1993. *Energie in de glastuinbouw van Nederland in 1991. Ontwikkelingen in de sector en op de bedrijven*. DLO-Landbouw-Economisch-Instituut (LEI-DLO), periodieke rapportage 39-91, s'Gravenhage
- Vermeulen, P. 1988, *Optimale verhouding tussen warmte-opslag en CO₂-dosering*, Vakblad voor de bloemisterij 43(1988)37
- Vermeulen, P., 1987, *Wat kost het aanhouden van 340, 400 of 500 dpm CO₂?*, Groenten en fruit 42(1987)30. p. 117-119
- Vermeulen, P., 1995, *Koolzuurgas: warmtebuffer beter dan aanvullend doseren*, Groenten+fruit/glasgroenten 5(1995)1, p. 14-15
- Vermeulen, P. en H. van de Beek, 1992, *Beslissingsmodel voor CO₂ in de glastuinbouw. Investeringsselectie en doseertechniek. Aanvullend CO₂ doseren en warmteopslag; kwantitatieve informatie*. PTG, verslag nr 14
- Zwart, H.F. de, 1996. *A simulation model to analyse energy saving potentials in protected cultivation* Proefschrift, Landbouwuniversiteit Wageningen (in voorbereiding)

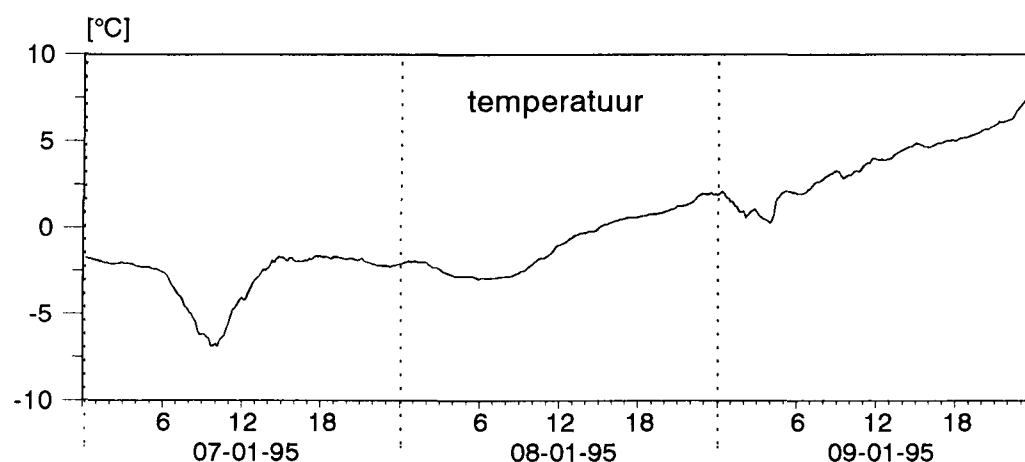
Bijlage: KASPRO in vergelijking met metingen

Tijdens de ontwikkeling van het simulatiemodel is veelvuldig een vergelijking gemaakt tussen modelresultaten en meetgegevens die uit een proefaccommodatie van IMAG-DLO werden verkregen. De proefaccommodatie bestond uit een Venlo-kas met vier identieke afdelingen, elk met een vloeroppervlak van 192 m² (drie kappen van elk 3,20 m breed en 20 m lang). In de afdelingen werden rozen geteeld op roltafels. In twee afdelingen werden de rozen gedurende de winterperiode belicht volgens een bij rozen gebruikelijke belichtingsstrategie. Eén SON-T AGRO lamp belichtte daarbij 10 m². In de andere twee afdelingen werd geen belichting toegepast. Alle afdelingen waren uitgerust met een energiescherm. Het energiescherm werd gesloten als de buitentemperatuur onder de 5 °C zakte. Indien het in de kas te vochtig werd (RV>80%) dan trok het scherm een vochtkier. In de belichtingsperiode (augustus t/m maart) werden 's nachts de verduisteringsschermen in de gevels gesloten (ook in de niet-belichte afdelingen).

Voor de verwarming waren twee netten beschikbaar. Het buisrailnet werd gebruikt als primair net. Het lag onder de roltafels en omvatte 12 pijpen per afdeling. Een belangrijk deel van de warmte-afgifte van dit net was gerelateerd aan de minimumbuis. Het bovennet bestond uit 8 pijpen per afdeling en hing ongeveer 2 meter boven de vloer. Het bovennet werd alleen gebruikt als het ondernet warmer werd dan 55 °C. Bij toenemende warmtevraag vanaf die temperatuur liepen de beide netten parallel op.

Ten behoeve van de vergelijking tussen model en werkelijkheid werden de temperaturen die in de meetbox van de afdeling werden gemeten vastgelegd samen met de gegevens van het weerstation, de pijptemperaturen vlak achter de mengklep, de retourtemperaturen van de beide netten en de raamstanden. Daarnaast werd de CO₂-dosering en de CO₂-concentratie in de afdelingen vastgelegd. De CO₂-gift vond plaats met zuivere CO₂. Tenslotte werd het debiet door de verwarmingsnetten gemeten, zodat gecombineerd met aanvoer- en retourtemperatuur het door de pijpen afgegeven vermogen kon worden bepaald.

De resultaten die met het model werden behaald worden gepresenteerd op twee tijdschalen. De eerste serie figuren betreft de vergelijking van modeluitkomsten met metingen voor drie opeenvolgende dagen in januari 1995 op basis van 10 minuten gemiddelden. Dit laatste tijdvak is gekozen omdat in deze drie dagen zowel een sombere als lichte dagen waren en de buitenlucht temperatuur voldoende varieerde.

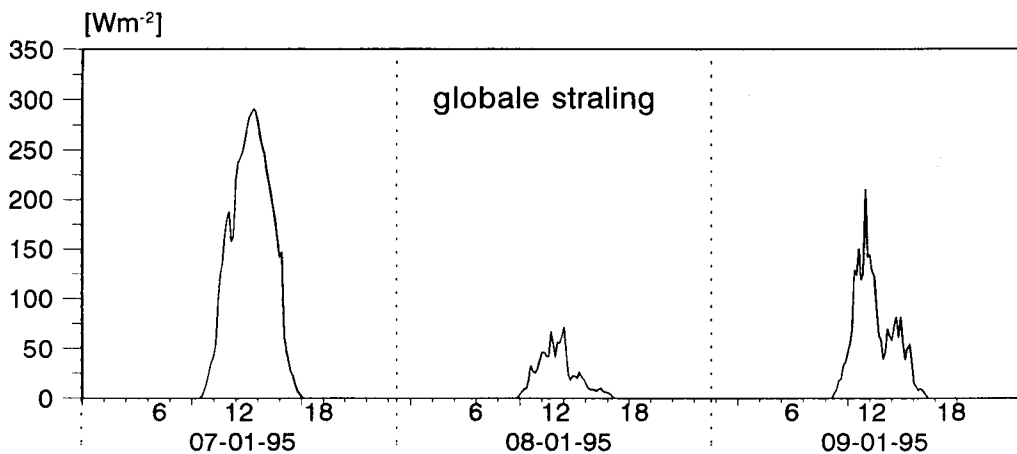


Figuur 1 Buitentemperatuur ter plaatse van de proef-accommodatie over de periode 07-01-95 tot en met 09-01-95.

Figure 1 Outside air temperature at the research facility on 07-01-95 up till 09-01-95.

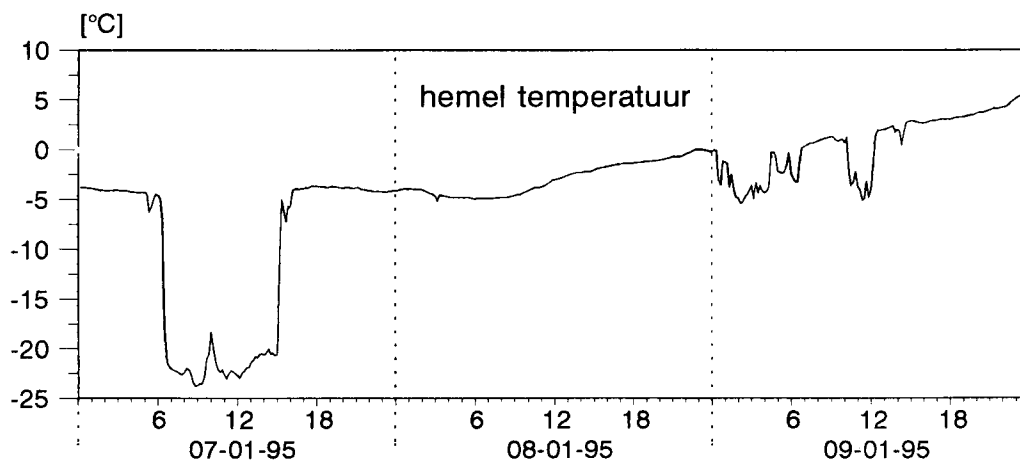
Het verloop van de buitenluchttemperatuur over de drie dagen die zijn gebruikt voor de modelvergelijking op kleine tijdschaal is weergegeven in figuur 1. Uit de figuur blijkt dat over de beschouwde periode de buitentemperatuur langzaam stijgt. De eerste anderhalve dag voor het en het tweede deel van de periode bleef de temperatuur boven nul. Het feit dat de temperatuur op 07-01-95 overdag sterk daalde, doet vermoeden dat gedurende de dag het wolkendek is opgebroken. Dit vermoeden wordt ondersteund door het hoge niveau van globale straling (figuur 2) en de lage hemeltemperatuur die op die dag tussen 6:00 en 15:00 werd gemeten (figuur 3).

De tweede dag is somber en de derde dag kent afwisselend weer.



Figuur 2 Globale straling ter plaatse van de proef-accommodatie over de periode 07-01-95 tot en met 09-01-95.

Figure 2 Global radiation at the research facility on 07-01-95 up till 09-01-95.

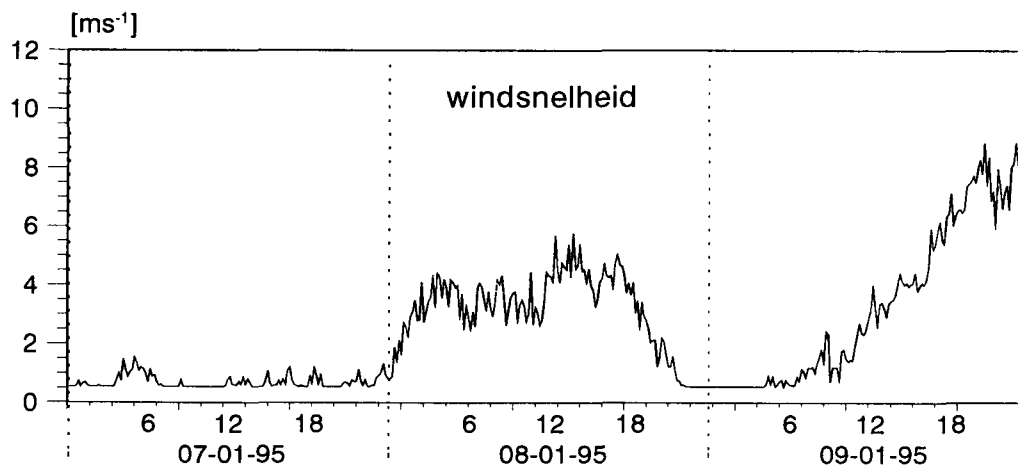


Figuur 3 Hemeltemperatuur ter plaatse van de proef-accommodatie over de periode 07-01-95 tot en met 09-01-95.

Figure 3 Sky temperature at the research facility on 07-01-95 up till 09-01-95.

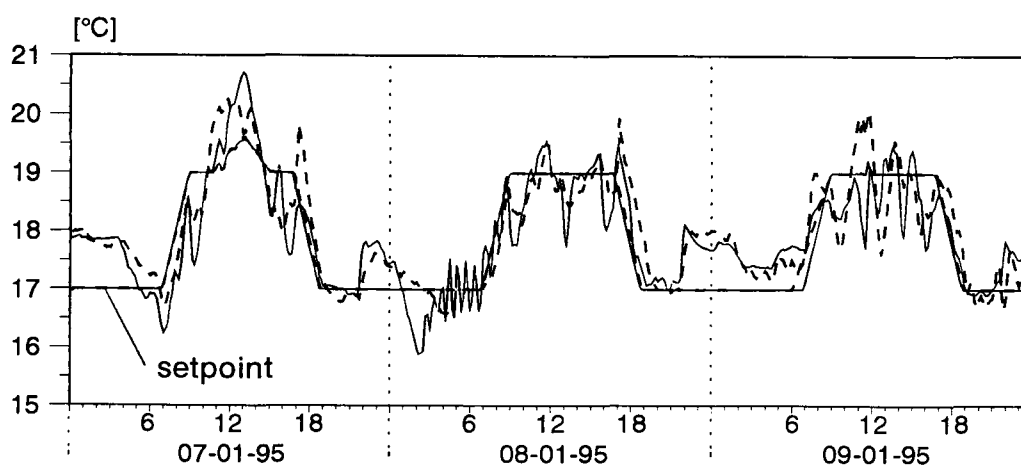
De windsnelheid, afgebeeld in figuur 4 neemt vooral op de derde dag fors toe.

De eerste figuur waarin de resultaten van het simulatiemodel worden vergeleken met de metingen staat afgebeeld in figuur 5. Het betreft het gesimuleerde en geregistreerde temperatuursetpoint en de gemeten en gesimuleerde kasluchttemperatuur.



Figuur 4 Windsnelheid ter plaatse van de proef-accommodatie over de periode 07-01-95 tot en met 09-01-95.

Figure 4 Wind speed at the research facility on 07-01-95 up till 09-01-95.



Figuur 5 Gemeten (– – –) en gesimuleerd (—) setpoint en gerealiseerde kaslucht temperaturen

Figure 5 Measured (– – –) and simulated (—) temperature setpoint and realized temperature

Uit de figuur blijkt dat de gesimuleerde en waargenomen setpoints helemaal samen vallen. Dit is echter niet verwonderlijk want het algoritme dat het setpoint in het simulatiemodel berekent is een kopie van het stuk programmatuur in de echte kasklimaatregelaar. Merk op dat op de eerste dag de werking van de lichtafhankelijke setpointverhoging is te zien.

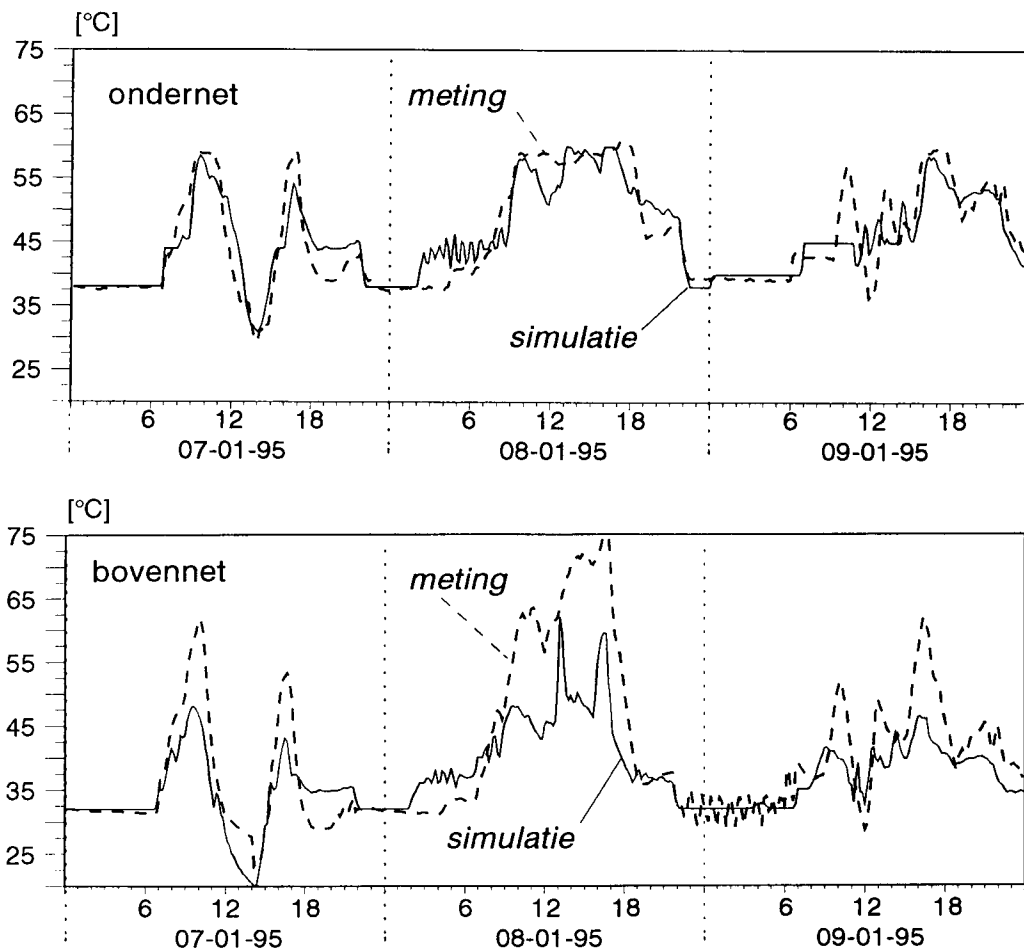
Het verschil tussen model en meting blijft bijna overal binnen de 0,5 °C. Tevens is de dynamiek van de gesimuleerde temperaturen gelijk aan de gemeten waarden. Zo stemt de berekende temperatuurval van ruim één graad bij het openlopen van het scherm goed overeen met de gemeten situatie.

Pijptemperatuur en warmtebehoefte

In figuur 6 zijn gemeten en gesimuleerde pijptemperaturen, vlak na de mengklep in het onder- en bovennet afgebeeld.

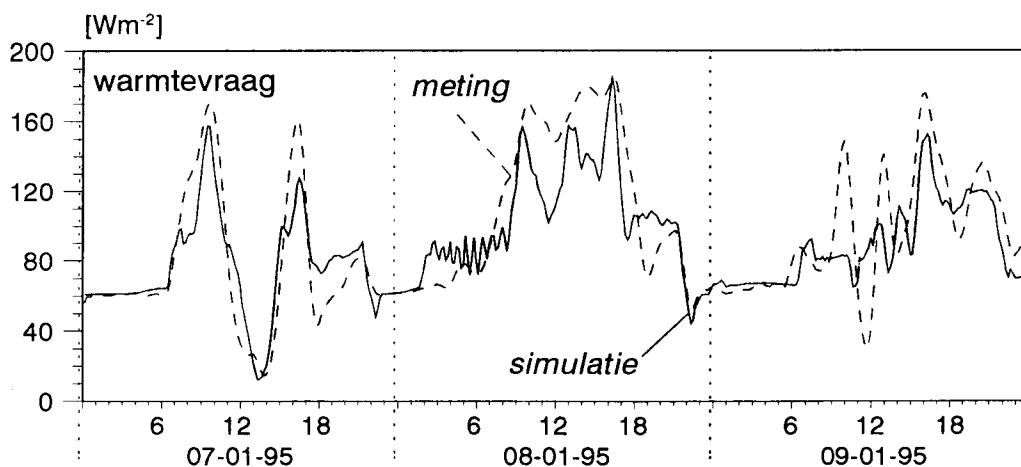
Uit de constante temperaturen gedurende het grootste deel van de nachten mag worden verondersteld dat de pijptemperaturen worden beheerst door de minimumbuis en niet door de warmtebehoefte van de kas. Deze veronderstelling wordt bevestigd wanneer in figuur 5 wordt waargenomen dat de kasluchttemperatuur structureel boven het setpoint ligt.

De lagere temperatuur die voor het bovennet wordt gesimuleerd voor een aantal periodes in de tweede en derde dag laat zien dat het model de warmtebehoefte van de kas hier en daar wat onderschat. Dit blijkt des te meer uit figuur 7 waar de gemeten en gesimuleerde verwarmingsvermogens zijn afgebeeld.



Figuur 6 Gemeten en gesimuleerde pijptemperatuur vlak na de mengklep in het ondernet (a) en in het bovennet (b).

Figure 6 Measured and simulated pipe temperatures in the lower heating pipe (a) and the upper heating pipe (b).



Figuur 7 Gemeten en gesimuleerde warmtebehoefte

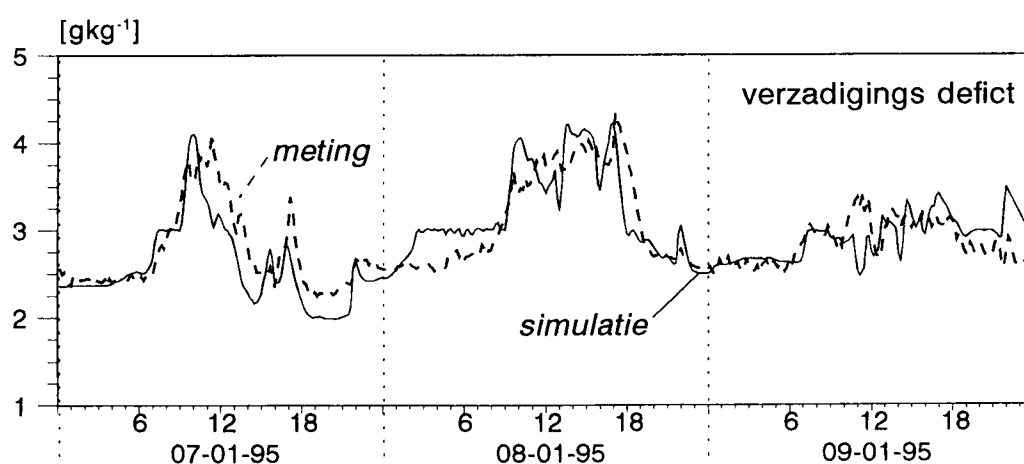
Figure 7 Measured and simulated heating power

De curven in figuur 7 zijn gefilterde waarnemingen (middels een 6-punts voortschrijdend gemiddelde) omdat anders zowel de gemeten als de gesimuleerde curven niet goed te zien zijn door de vele fluctuaties.

Vochtgehalte en raamopening

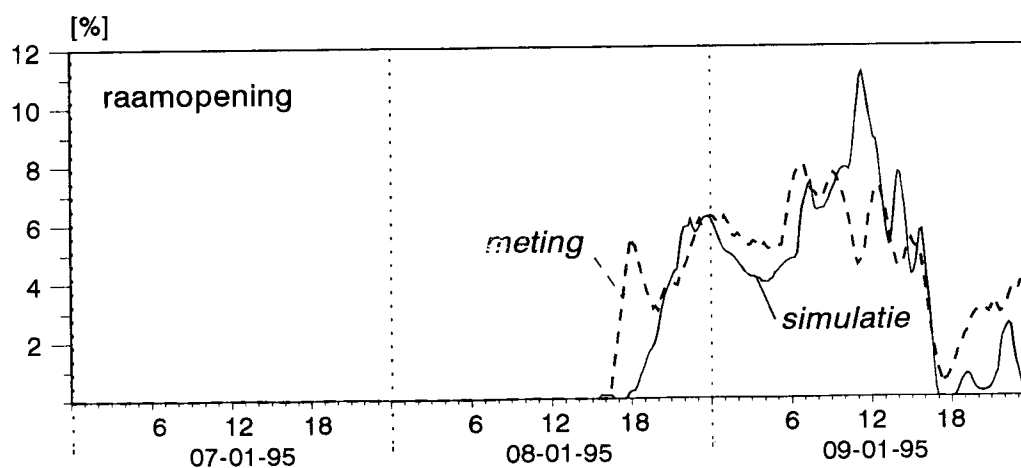
Het vochtgehalte van de kaslucht, uitgedrukt middels het verzadigingsdeficit werd door het model goed beschreven (figuur 8). Een combinatie van figuur 5 en 8 met figuur 9, waarin de gemeten en gesimuleerde raam openingen zijn weergegeven, toont het belang van de modellering van het vochtgehalte aan. De combinatie laat namelijk zien dat de raamopening op de derde dag bepaald wordt op grond van de vochtregeling. De vocht regelaar opende de ramen als het verzadigingsdeficit 's nachts onder de 3 g/kg kwam en overdag onder de 3,5 g/kg. Omdat het model voor de avond van het derde etmaal een groter verzadigingsdeficit berekende bleven de ramen in de simulatie daar dicht, terwijl de gemeten raamopening ongeveer 2% bedroeg.

De ramen blijven in de eerste periode van de beschouwde tijdspanne gesloten vanwege de vorst-beveiliging op de ramen.



Figuur 8 Gemeten en gesimuleerd verzadigingsdeficit.

Figure 8 Measured and simulated saturation pressure deficit



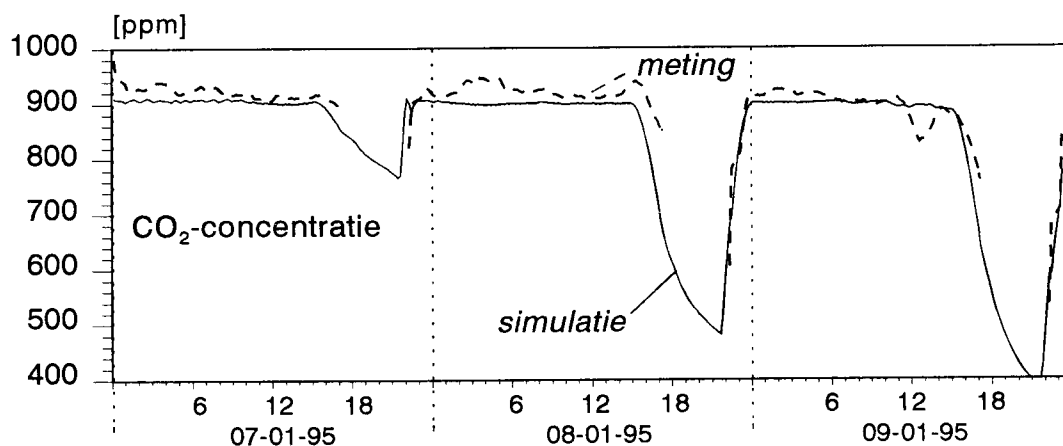
Figuur 9 Geregistreeerde en gesimuleerde raamopening

Figure 9 Measured and simulated window aperture

CO₂-concentratie en CO₂-dosering

Naast vocht en temperatuur is de CO₂-concentratie de derde belangrijke door het model gesimuleerde grootheid. In figuur 10 zijn de berekende en gesimuleerde CO₂-concentraties afgebeeld. Overdag en 's nachts, gedurende de periode dat de belichting in werking was, lag het CO₂-setpoint op 900 ppm. Het model realiseert deze concentratie dan ook voor het grootste deel van de tijd. In het derde etmaal wordt het setpoint voor CO₂ verlaagd als de ramen openlopen. De concentratie wordt dan dus in model en metingen wat lager.

Op de momenten dat in de kas waarin de metingen hebben plaatsgevonden de lampen uit gingen werd er preventief gezwaveld tegen meeldauw. Om te voorkomen dat de CO₂-meter door zwavel vervuild zou raken werd deze gedurende de zwavel-periode uitgezet, wat in de gemeten waarde tot uitdrukking komt als onderbrekingen in de lijnstukken. Daardoor kan helaas niet worden gezien hoe de gesimuleerde concentratie-afname na het stoppen van de dosering zich verhoudt met de werkelijke afname. Echter, de start-punten van de gemeten curves op de momenten dat de dosering weer hervat werd zijn wel zichtbaar. Het blijkt dat die wat hoger liggen dan de gesimuleerde start-punten. Het model berekent dus voor de beschouwde nachten wat grotere verliezen dan in werkelijkheid hebben plaatsgevonden.



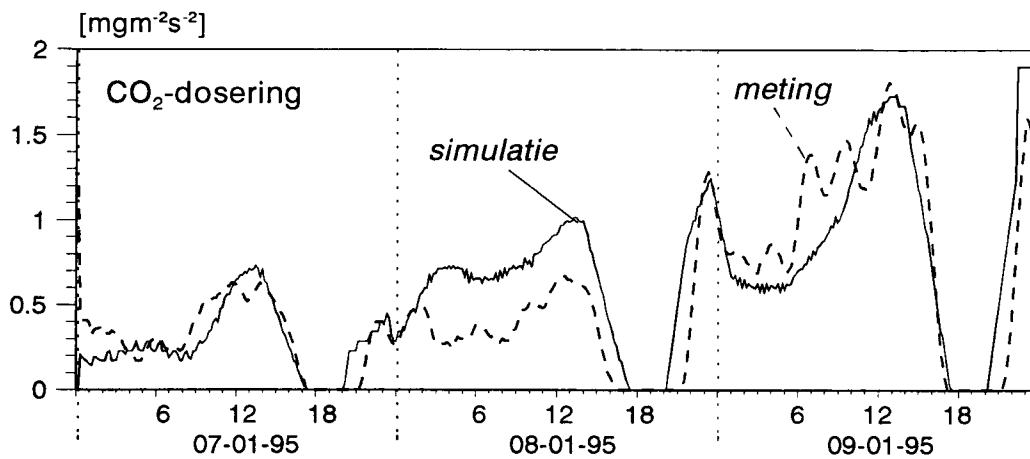
Figuur 10 Gemeten en gesimuleerde CO₂-concentratie

Figure 10 Measured and simulated CO₂-concentration

Nog belangrijker dan de CO₂-concentratie is de hoeveelheid CO₂ die gedoseerd moet worden om de gemeten en gesimuleerde concentraties te realiseren.

Figuur 11 onderstreept het vermoeden dat de CO₂-verliezen die het model berekent groter zijn dan de verliezen in werkelijkheid, omdat, met name in de tweede dag, het model berekent aanzienlijk meer CO₂ te moeten doseren.

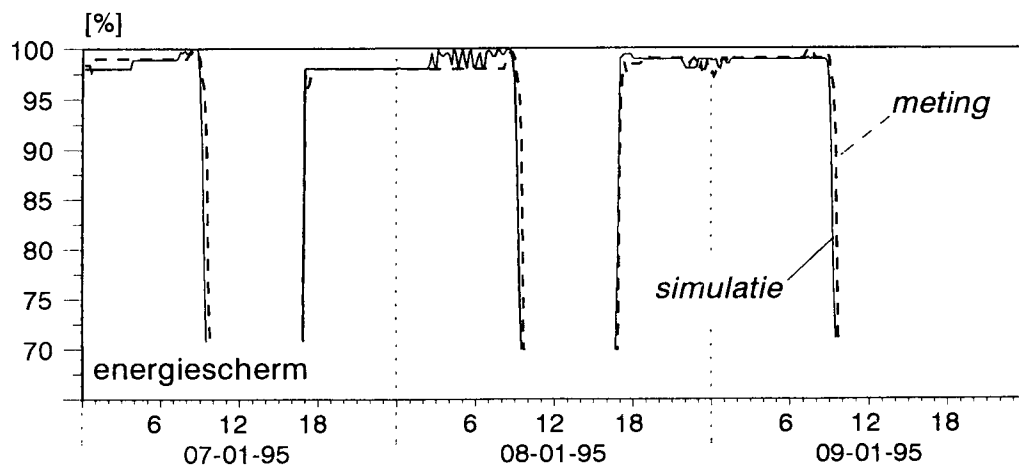
Een verklaring voor de waargenomen verschillen is wellicht de aanwezigheid van een vrij sterke CO₂-gradient, gecombineerd met de plaats waar de CO₂-meting heeft plaatsgevonden. Als er in het gewas (daar waar de concentratie gemeten is) een behoorlijk hogere CO₂-concentratie aanwezig is, bijvoorbeeld omdat de dosering onderin het gewas plaatsvindt, zal de gemeten concentratie makkelijker kunnen worden gerealiseerd dan wanneer de kas een homogene CO₂-concentratie heeft, zoals het model impliciet verondersteld.



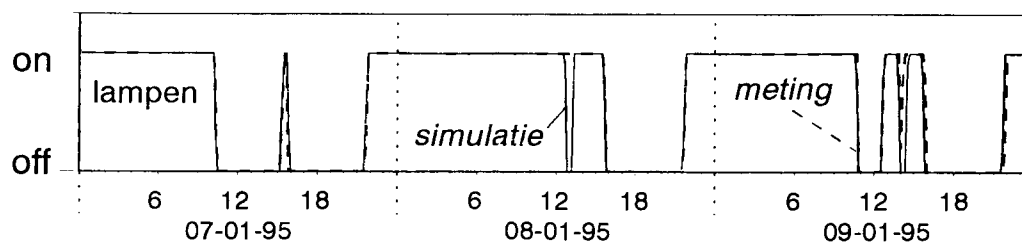
Figuur 11 Gemeten en gesimuleerde CO₂-dosering
Figure 11 Measured and simulated carbon dioxide supply rate

Schermen en belichting

In figuur 12 worden de berekende en gemeten schermposities afgebeeld en in figuur 13 wordt het in- en uitschakelen van de belichting aangegeven. De belichting wordt geschakeld door hetzelfde algoritme als toegepast in de werkelijke klimaatregelaar, dus ook hier mag worden verwacht dat meting en simulatie samenvallen. Kleine verschillen kunnen evenwel optreden als het lichtniveau rond het schakelpunt ligt, zoals op 08-01-95 het geval was.



Figuur 12 Geregistreerde en gesimuleerde schermpositie
Figure 12 Registered and simulated screen position



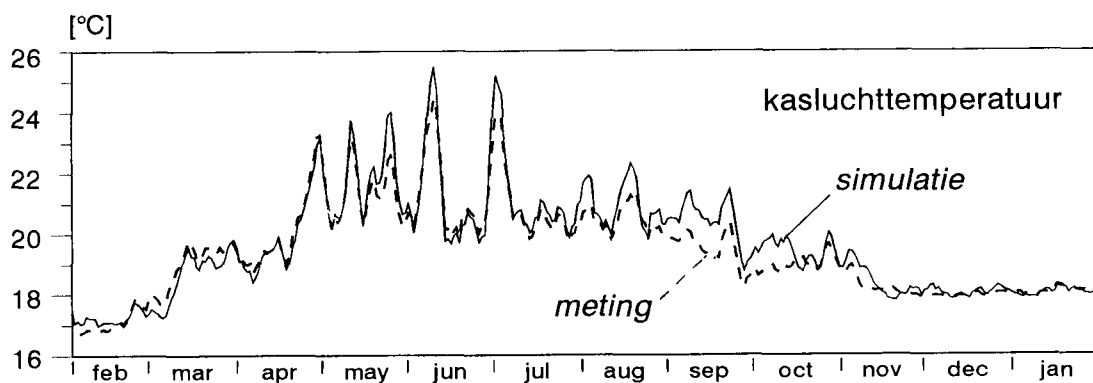
Figuur 13 Geregistreerde en gesimuleerde belichtingsstatus
Figure 13 Registered and simulated state of the artificial illumination

In zowel de simulatie als de metingen is gedurende de getoonde drie etmalen het scherm bijna nooit helemaal dicht geweest. Dit komt doordat het verzadigingsdeficit vrijwel altijd onder de 3,5 g/kg lag, zodat het scherm steeds een vochtlier trok. In de avond van het derde etmaal bleef de buitentemperatuur boven de 5 °C, waardoor het scherm niet sloot.

Jaarrond simulatie

Naast de korte termijn vergelijkingen tussen model en metingen kunnen ook lange termijn vergelijkingen worden uitgevoerd. Figuur 14 toont de vergelijking tussen daggemiddelde gemeten en gesimuleerde kasluchttemperaturen.

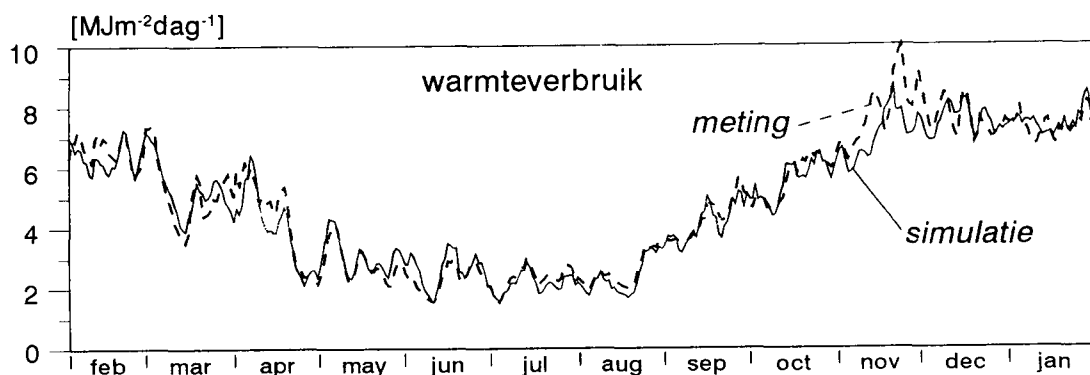
Over het algemeen corresponderen de gesimuleerde temperaturen goed met de gemeten waarden. Alleen in de erg warme perioden van het jaar stijgt de gesimuleerde etmaal temperatuur flink boven de gemeten waarde uit (>1 °C). Dit komt waarschijnlijk doordat de formules die worden gebruikt om het ventilatiedebiet door de volledig geopende ramen te berekenen de luchtuitwisseling onderschatten.



Figuur 14 Gemeten en gesimuleerde daggemiddelde kasluchttemperatuur.

Figure 14 Measured and simulated daily mean greenhouse air temperature.

Tenslotte wordt in figuur 15 de meting en simulatie van het dagelijks gemiddelde warmteverbruik weergegeven. Uit de figuur blijkt dat over iets langere perioden het gesimuleerde warmte-verbruik heel goed overeenkomt met het gemeten warmte-verbruik.



Figuur 15 Gemeten en gesimuleerd dagelijks warmteverbruik

Figure 15 Measured and simulated daily heat demand

Rapportenoverzicht 1995

- 95-1 Out, P.G. en J.J.G. Breuer, 1995 – Effect van gecoat glas op de lichttransmissie en het energieverbruik van tuinbouwkassen.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 103 pp. f 45,00
- 95-2 Kroodsmā, W., N.W.M. Ogink, R. Bleijenberg en M.A. Bruins, 1995 – Mestdroging in een leghennenstal met mestbandbatterijen: energieverbruik, drogestofgehalte van de mest en ammoniakemissie
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 31 pp. f 35,00
- 95-3 Feenstra, F., J.K. Gigler, R.M. de Mol en A.H. Bosma, 1995 – Logistiek bij de inzameling van biomassa.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 44 pp. f 40,00
- 95-4 Huijs, J.P.G. en H.F. de Zwart, 1995 – Energie-effecten bij inzet WKK in eiland- en parallel-bedrijf in kassen
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 46 pp. f 40,00
- 95-5 Blokhuis, H.J. en J.H.M. Metz, 1995 – Volièrehuisvesting voor leghennen.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 204 pp. f 75,00
- 95-6 Breemhaar, H.G. en A. Bouman, 1995 – Oogsten en schonen van voor de akkerbouw nieuwe, oliehoudende gewassen.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 28 pp. f 35,00
- 95-7 Telle, M.G. en P. Knies, 1995 – Verschillen in elektriciteitsverbruik op Friese melkveebedrijven.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 33 pp. f 30,00
- 95-8 Derikx, P.J.L., A.J.A. Aarnink, P. Hoeksma en H.C. Willers, 1995 – Vermindering van ammoniakemissie uit mest van een vloeibare afdeklaag.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 55 pp. f 45,00
- 95-9 Maljaars, J.M., G.D. Vermeulen en M.C. Sprong, 1995 – Mechanisatiemogelijkheden bij diepstrooiselsystemen in varkensstallen.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 48 pp. f 45,00
- 95-10 Krause, M., 1995 – Verhalten und Körperschäden von Jungsauen in Gruppenhaltung bei simultaner oder sequentieller Futterzuteilung mit oder ohne Strohangebot.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 126 pp. f 45,00
- 95-11 Michorius, J.A.T., K.D. Hartog, R. Scholtens en H. Harssema, 1995 – Ammoniakemissiemeting aan stalcomplexen met de fluxraammethode en het Gaussisch pluimmodel: een haalbaarheidsstudie.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 32 pp. f 40,00
- 95-12 Hoeksma, P., N.W.M. Ogink, P.J.L. Derikx en G.W.M. Willems, 1995 – Bemonstering van drijfmest in transportwagens.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 35 pp. f 35,00
- 95-13 Huijsmans, J.F.M. en J.M.G. Hol, 1995 – Ammoniakemissie bij het in een tweede werkgang onderwerken van dunne varkensmest op bouwland.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 34 pp. f 30,00
- 95-15 Zande, J.C. van, H.J. Holterman en J.F.M. Huijsmans, 1995 – Driftbeperking bij de toediening van gewasbeschermingsmiddelen. Evaluatie van de technische mogelijkheden met een driftmodel.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 40 pp. f 30,00
- 95-16 Hoeksma, P., T.K. Vijn, P.J.L. Derikx en H.C. Willers, 1995 – Invloed van aanzuren op het gehalte aan vluchtige vetzuren in verse vleesvarkensmengmest
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 32 pp. f 30,00
- 95-17 Kroodsmā, W., J.W.H. Huis in 't Veld en N.W.M. Ogink, 1995 – Ammoniakemissie uit een ligboxenstal voor melkvee: emissieniveau en temperatuurseffect.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 28 pp. f 30,00
- 95-18 Hoeksma, P., N.W.M. Ogink, P.J.L. Derikx en G. Groot Roessink, 1995 – Bemonstering van varkens- en rundveedrijfmest in silo's.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 34 pp. f 30,00

- 95-19 Porskamp, H.A.J., M.G.P. Michielsen, J.F.M. Huijsmans en J.C. van de Zande, 1995 – Emissie-beperkende spuittechnieken voor de akkerbouw. De invloed van luchtondersteuning, dopkeuze en teeltvrije zone op de emissie van gewasbeschermingsmiddelen buiten het perceel.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 44 pp. f 30,00

De rapporten kunt u schriftelijk bestellen door overmaking van het genoemde bedrag op Postbanknummer 3514771 ten name van IMAG-DLO te Wageningen, onder vermelding van het rapportnummer.

Reports must be ordered by transferring the appropriate amount (in Dutch Guilders) to the IMAG-DLO account, no. 3514771, at the Postbank, Wageningen, quoting the relevant report number(s)